Stroboskopischer Schlüpfungsmesser

für asynchrone Wechsel- und Drehstrommotoren.

DISSERTATION

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

von der

Königlichen Technischen Hochschule zu Berlin

genehmigt.

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Gustav Wagner

aus Wiesbaden.

Referent: Geheimer Regierungsrat Professor Dr. A. Slaby.

Korreferent: Privatdozent Gisbert Kapp.

BERLIN.

VERLAG VON JULIUS SPRINGER.

1904.

Bekanntlich rufen die mit Wechselstrom betriebenen Lichtquellen stroboskopische Erscheinungen hervor. In der Fachliteratur ist eine Methode angegeben (Benischke, Elektrotechnische Zeitschrift, 1899, Seite 142—144; Benischke, Annalen der Physik, 1901, Vierte Folge, 5. Band, Seite 487—488), nach welcher man kleine Schlüpfungsgrade asynchroner Wechsel- und Drehstrommotoren auf stroboskopischem Wege ermitteln kann. Nach dieser Methode werden die stroboskopischen Erscheinungen durch eine mit radialen Schlitzen versehene Scheibe hervorgerufen, welche auf der Welle des zu untersuchenden Asynchronmotors sitzt und von einer Wechselstrombogenlampe beleuchtet wird; Lampe und Motor müssen von demselben Wechselstrom gespeist werden. Die angeführte Methode hat den Nachteil, daß sie, wie weiter unten gezeigt werden wird, nur zur Ermittlung verhältnismäßig kleiner Schlüpfungsgrade benutzt werden kann und daß das stroboskopische Bild, welches bei der Schlüpfungsermittlung die Hauptrolle spielt, besonders bei kleiner Polzahl des zu untersuchenden Motors und wenn zur Beleuchtung der rotierenden Scheibe nur Wechselstromglühlampen zur Verfügung stehen, schwer bezw. überhaupt nicht mehr erkennbar ist.

Im Gegensatz hierzu besitzt die Methode, welche ich im folgenden entwickeln werde, den Vorzug, daß man nach ihr beliebig große Schlüpfungsgrade asynchroner Wechsel- und Drehstrommotoren mit außerordentlich großer Genauigkeit ermitteln kann und daß das in Frage kommende stroboskopische Bild der rotierenden Streifenscheibe unabhängig von der Polzahl und damit auch der Tourenzahl des zu untersuchenden Asynchronmotors sowohl im Wechselstrombogenlichte als auch im Wechselstromglühlichte stets mit Sicherheit zu erkennen ist.

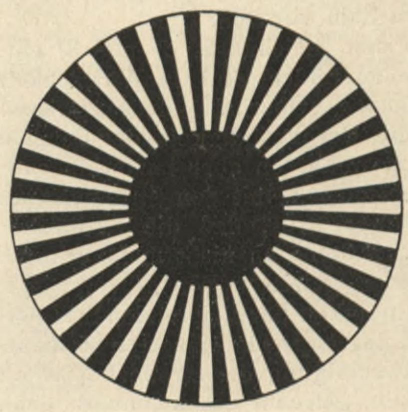
Über die allgemeine Beziehung zwischen der Drehgeschwindigkeit einer rotierenden Scheibe und derjenigen ihres stroboskopischen Bildes befinden sich an verschiedenen Stellen der Fachliteratur zum Teil unklare, zum Teil unrichtige Angaben; es werden weiter unten die betreffenden Stellen der Fachliteratur angeführt und in entsprechender Weise klargestellt bezw. berichtigt werden.

Die Wahrnehmbarkeit stroboskopischer Erscheinungen ist allgemein abhängig:

1. Von dem Aussehen des bewegten Gegenstandes, mittels dessen die stroboskopischen Lichterscheinungen dem Auge erkennbar gemacht werden.

2. Von der Art des mit Wechselstrom betriebenen Lichtes.

Zum Punkte 1 sei bemerkt, daß nicht jeder Körper sich gleich gut zum Erkennen der stroboskopischen Lichterscheinungen eignet. Benischke verwendet z. B. nach seiner oben schematisch angegebenen Methode Scheiben mit radialen Schlitzen; nach meinen Beobachtungen eignen sich zu jenem Zwecke am besten Scheiben, die nach Fig. 1 mit z schwarzen und z weißen, gleich breiten Sektorenstreifen versehen sind und im Lichte einer mit Wechselstrom betriebenen Lichtquelle in gleichförmige Drehung versetzt werden.



$z = 36.$

Fig. 1.

Zum Punkte 2 sei folgendes bemerkt: Am besten wahrnehmbar sind die stroboskopischen Erscheinungen im Wechselstrombogenlichte, weniger gut, aber immerhin noch deutlich erkennbar sind sie im Lichte von Osmiumlampen und gewöhnlichen Kohlenfadenglühlampen (mit Wechselstrom betrieben), allerdings nur dann, wenn die Lampen geringe Leuchtkraft haben und sie so dicht an den rotierenden Gegenstand (Schlitzscheibe oder Streifenscheibe) gebracht werden, daß die von kontinuierlichen Lichtquellen (Tageslicht, Gaslicht usw.) herrührende Beleuchtungsintensität gegenüber derjenigen der Glühlampen wesentlich zurücktritt. Am schlechtesten wahrnehmbar sind die stroboskopischen Erscheinungen im Lichte von Nernstlampen (mit Wechselstrom betrieben).

Versetzt man die oben beschriebene Streifenscheibe (Fig. 1) im Lichte einer mit Wechselstrom betriebenen Lichtquelle, z. B. einer Wechselstrombogenlampe in rotierende Bewegung, so erscheinen bei bestimmten Tourenzahlen der Scheibe eine Reihe stroboskopischer Bilder, von denen jedes einen genau begrenzten Geschwindigkeitszustand der rotierenden Streifenscheibe kennzeichnet. Aus der großen Zahl dieser stroboskopischen Bilder greife ich das Bild heraus, welches stets am deutlichsten und schärfsten wahrnehmbar ist; es erscheint, wenn die Tourenzahl der rotierenden Streifenscheibe

$$1) \quad \ldots\ldots \quad n_1 = \frac{60\,w}{z}$$

ist.

In dieser Gleichung bezeichnet n_1 die minutliche Umdrehungszahl der rotierenden Streifenscheibe, z die Zahl ihrer schwarzen bezw. weißen Streifen, w die Stromwechselzahl pro Sekunde.

Bemerkt sei noch, daß in der Folge alle Tourenzahlen, wenn nichts weiteres angegeben ist, sich auf den Zeitraum einer Minute beziehen.

Das durch Glchg. 1) gekennzeichnete stroboskopische Bild der rotierenden Streifenscheibe soll als das „1 stroboskopische Hauptbild" derselben bezeichnet werden, einmal im Gegensatz zu dem zweiten, dem dritten . . . . dem $k$ten stroboskopischen Hauptbilde, welche erscheinen, wenn die Tourenzahl der rotierenden Streifenscheibe

$$2) \quad \ldots\ldots \quad n_k = k \cdot \frac{60\,w}{z}$$

ist, fürs andere im Gegensatz zu den stroboskopischen Zwischenbildern mit $(2\,k + 1)$ facher Streifenzahl $[(2\,k + 1) \cdot z]$, welche zwischen den stroboskopischen Hauptbildern erscheinen, wenn die Tourenzahl der Streifenscheibe

$$3) \quad \ldots \quad n_{\left(\frac{q}{2k+1}\right)} = \frac{q}{2\,k+1} \cdot \frac{60\,w}{z}$$

ist. In Glchg. 2) und 3) bezeichnet k eine beliebige ganze Zahl, während q (Glchg. 3) eine ganze nicht durch $(2\,k + 1)$ teilbare Zahl vorstellt.

Nicht alle der in den Gleichungen 2) und 3) enthaltenen stroboskopischen Bilder sind in Wirklichkeit für das Auge wahrnehmbar. Oberhalb eines gewissen Wertes von n wird die Geschwindigkeit der Scheibe im Verhältnis zu der zwar kurzen aber immerhin endlichen Zeitdauer der periodisch mit den Strommaxima auftretenden Lichtblitze so groß, daß die stroboskopischen Bilder von dieser Stelle an nicht mehr erkennbar sind; unterhalb eines gewissen Wertes von n dagegen wird die Geschwindigkeit der rotierenden Streifenscheibe so gering, daß das Auge die einzelnen Momentbilder, durch deren Vereinigung die stroboskopischen Zwischenbilder entstehen, getrennt nebeneinander sieht. Bei Bogenlichtbeleuchtung erkennt man in der Regel die drei ersten Hauptbilder: $n_1 = \frac{60\,w}{z}$, $n_2 = 2 \cdot \frac{60\,w}{z}$, $n_3 = 3 \cdot \frac{60\,w}{z}$ entsprechend $k = 1$, 2 u. 3 in Glchg. 2) und die drei ersten Zwischenbilder: $n_{1/3} = {}^1/_3 \cdot \frac{60\,w}{z}$, $n_{1/5} = {}^1/_5 \cdot \frac{60\,w}{z}$, $n_{1/7} = {}^1/_7 \cdot \frac{60\,w}{z}$ entsprechend $q = 1$ und $k = 1$, 2 u. 3 in Glchg. 3), bei Glühlampenbeleuchtung dagegen meistens nur das erste Hauptbild und allenfalls noch das erste Zwischenbild der rotierenden Streifenscheibe.

Das bei der Tourenzahl der Glchg. 1) stillstehend erscheinende erste stroboskopische Hauptbild gleicht in seinem Aussehen dem Bilde der Streifenscheibe, besteht demzufolge aus z dunklen und z hellen Streifen (z = Zahl der schwarzen bezw. der weißen Streifen der rotierenden Sektorenscheibe). Der Helligkeitsunterschied zwischen den dunklen und hellen Streifen des stroboskopischen Bildes hängt wesentlich von der Art des zur Beleuchtung der rotierenden Streifenscheibe benutzten Wechselstromlichtes ab. Am lichtkräftigsten und schärfsten erscheint das 1. stroboskopische Hauptbild im Wechselstrombogenlichte, während es im Wechselstromglühlichte (Osmium- und Kohlenfadenglühlampen) bedeutend lichtschwächer und verschwommener in Erscheinung tritt; allerdings ist, wie bereits oben bemerkt wurde, seine Wahrnehmbarkeit abhängig von der Leuchtkraft der benutzten Glühlampen. Bei Lampen von 10—16 NK ist das 1 stroboskopische Hauptbild der rotierenden Streifenscheibe zwar ziemlich lichtschwach aber doch noch vollkommen deutlich zu erkennen; mit zunehmender Leuchtkraft der Lampen wird die Wahrnehmbarkeit des stroboskopischen Bildes immer schlechter und bei Glühlampen von etwa 50 NK ist jenes stroboskopische Bild der rotierenden Streifenscheibe nur schwer bezw. bisweilen überhaupt nicht mehr zu erkennen. Im Lichte von Nernstlampen (mit Wechselstrom betrieben) selbst von geringer Leuchtkraft, ist, wie bereits oben erwähnt wurde, das 1 stroboskopische Hauptbild so lichtschwach und verschwommen, daß es in der Regel nur außerordentlich schwer zu erkennen ist.

Aus diesem Grunde kann bei praktischen Ermittlungen, welche sich auf das Erscheinen bezw. eine bestimmte Drehgeschwindigkeit des 1 stroboskopischen Hauptbildes gründen, im allgemeinen nur das Licht von Wechselstrombogenlampen (beliebiger Intensität) oder von Wechselstromglühlampen geringer Leuchtkraft (mit Ausnahme der Nernstlampen) zur Beleuchtung der rotierenden Streifenscheibe Verwendung finden.

Besonders erwähnt sei noch an dieser Stelle eine eigentümliche Erscheinung, welche sich an dem 1 stroboskopischen Hauptbilde der rotierenden Streifenscheibe zeigt, wenn diese mittels einer Wechselstrom-Flammenbogenlampe beleuchtet wird. Bekanntlich unterscheiden sich die Flammenbogenlampen von den gewöhnlichen oder Lichtbogenlampen dadurch, daß ihre Kohlenstifte gewisse Zusätze von Metallsalzen enthalten, welche in dem Flammenbogen verdampfen und diesem eine eigentümliche Färbung geben. Je nach der Stellung der Kohlenstifte unterscheidet man im engeren Sinne des Wortes zwischen „Flammenbogenlampen", wenn die Kohlenstifte der Lampe senkrecht übereinander stehen (wie bei den gewöhnlichen Bogenlampen) und „Intensivflammenbogenlampen", wenn die Kohlenstifte unter einem spitzen Winkel gegeneinander geneigt sind. Auf diese Unterscheidung soll indes nicht näher eingegangen werden; vielmehr sollen beide Gruppen dieser Lampen, sowohl die Flammenbogenals auch die Intensivflammenbogenlampen schlechtweg als „Flammenbogenlampen" bezeichnet werden. Enthalten die Kohlenstifte (bezw. die Dochte) der Flammenbogenlampen Zusätze von Calciumsalzen, so hat bekanntlich das Licht der Lampe eine intensiv goldgelbe Färbung, bestehen dagegen die Zusätze aus gewissen Strontiumsalzen, so zeigt das Licht der Lampe eine rötlich-gelbe Farbe. Bei allen Wechselstrom-Flammenbogenlampen zeigen nun die stroboskopischen Bilder einer rotierenden Streifenscheibe eigentümliche charakteristische Farbenerscheinungen. In diesem Punkte unterscheiden sich also die stroboskopischen Erscheinungen des Wechselstrom-Flammenbogenlichtes wesentlich von denen des gewöhnlichen Wechselstrombogenlichtes und der Wechselstromglühlampen. Es würde den Rahmen des Gegenstandes dieser Abhandlung überschreiten, an dieser Stelle auf die Natur jener farbigen stroboskopischen Erscheinungen des Wechselstrom-Flammenbogenlichtes, die bei allen stroboskopischen Bildern einer rotierenden Streifenscheibe in mehr oder minder farbenkräftiger Form in Erscheinung treten, näher einzugehen; ich muß mich vielmehr darauf beschränken, aus meinen Untersuchungen über jene farbigen stroboskopischen Erscheinungen dasjenige herauszugreifen, was für das Thema der vorliegenden Abhandlung von Interesse oder von Belang ist. Aus diesem Grunde beschreibe ich im folgenden nur das Aussehen des 1 stroboskopischen Hauptbildes einer im Wechselstrom-Flammenbogenlichte rotierenden Streifenscheibe. Die Bedingung für das Erscheinen dieses stroboskopischen Bildes ist dieselbe wie bei den gewöhnlichen Wechselstrombogenlampen und Glühlampen (Glchg. 1). In der gleichen Weise besteht das stroboskopische Bild selbst aus z dunklen und z hellen Streifen (z = Streifenzahl der rotierenden Scheibe). Während nun aber beim gewöhnlichen Wechselstrombogenlichte und Glühlichte die dunklen Streifen des 1 stroboskopischen Hauptbildes gleichmäßig grauschwarz erscheinen, zeigen im Wechselstrom-Flammenbogenlichte die dunklen Streifen dieses Bildes an ihren beiden Randseiten verschiedene Färbung. Die Farben selbst hängen von den Metallsalzen ab, welche in den Kohlenstiften (bezw. den Dochten) der Flammenbogenlampen enthalten sind. Bei den Lampen mit goldgelbem Lichte (die Kohlenstifte enthalten Zusätze gewisser Calciumsalze) ist die eine Seite der dunklen Streifen des stroboskopischen Bildes blau, die andere gelb gefärbt; bei den Lampen mit rötlich-gelbem Lichte (die Kohlenstifte enthalten Zusätze gewisser Strontiumsalze) ist wiederum die eine Seite der dunklen Streifen des stroboskopischen Bildes blau, die andere dagegen rötlich-gelb gefärbt. Zwischen den Farbenstreifen an den Randseiten der dunklen Sektoren des stroboskopischen Bildes befindet sich eine Übergangszone, welche wie bei den gewöhnlichen Bogenlampen (Kohlen ohne Metallzusätze) eine grau-schwarze Färbung zeigt. Bezüglich der Seite der dunklen stroboskopischen Streifen, welche blau bezw. gelb oder rötlich-gelb (orange) gefärbt ist, gilt die folgende Regel, welche ich bei allen Flammenbogenlampen, die ich daraufhin an verschiedenen Orten (Mainz, Frankfurt, Charlottenburg usw.) untersucht habe, bestätigt fand:

„Die blaue Seite der dunklen Streifen des 1 stroboskopischen Hauptbildes einer im Wechselstrom-Flammenbogenlichte rotierenden Streifenscheibe eilt in der Drehrichtung der Scheibe stets voran, während die gelbe (Lampen mit goldgelbem Lichte) bezw. die rötlich-gelbe (Lampen mit rötlich-gelbem Lichte) Seite der dunklen stroboskopischen Streifen in der angegebenen Richtung nacheilt."

Es wird weiter unten gezeigt werden, daß sich das stroboskopische Bild der rotierenden Streifenscheibe je nach ihrer Tourenzahl sowohl in der Drehrichtung der Scheibe als auch in der entgegengesetzten Richtung bewegen kann; in beiden Fällen bleibt die oben angegebene Regel bestehen: „Stets eilt die blaue Seite der dunklen Streifen des stroboskopischen Bildes in der Drehrichtung der rotierenden Streifenscheibe (nicht etwa des stroboskopischen Bildes) voran." Man kann also, nebenbei bemerkt, diese Regel auch dazu benutzen, aus dem im Wechselstrom-Flammenbogenlichte erscheinenden 1 stroboskopischen Hauptbilde ohne weiteres die Drehrichtung der rotierenden Streifenscheibe anzugeben; das ist in dieser Weise beim gewöhnlichen Wechselstrom-Bogenlichte und -Glühlichte nicht möglich.

Nach dieser kleinen Abschweifung kehre ich zu dem eigentlichen Gegenstande der vorliegenden Abhandlung zurück.

Gleichung 1) läßt erkennen, daß, wenn w ein fester Wert ist, n_1 und z in der Weise von einander abhängig sind, daß entweder z oder n_1 willkürlich gewählt werden kann. Nun zeigt es sich aber, daß alle stroboskopischen Bilder einer rotierenden Streifenscheibe um so besser wahrnehmbar sind, je größer ihre Streifenzahl z und je kleiner damit ihre Tourenzahl n_1 ist. So erkennt man z. B. im Lichte einer Wechselstromglühlampe von 16 NK das 1 stroboskopische Hauptbild überhaupt nicht, wenn die Streifenzahl der rotierenden Scheibe $z = 4$ ist; nimmt man z größer, z. B. $z \backsim 18$—20, so wird das stroboskopische Bild sichtbar, aber immer noch sehr lichtschwach und verschwommen; macht man dagegen $z \geq 36$—40, so ist das stroboskopische Bild vollkommen klar und deutlich zu erkennen. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, stets $z \geq 36$ zu wählen, wenn das erste stroboskopische Hauptbild sowohl bei Bogenlicht- als auch bei Glühlampenbeleuchtung deutlich wahrnehmbar sein soll.

Bei dem durch Glchg. 1) festgelegten Geschwindigkeitszustande der rotierenden Streifenscheibe erscheint das 1 stroboskopische Hauptbild derselben dem Auge stillstehend. Wird die Tourenzahl der Scheibe größer oder kleiner als n_1, so fängt das stroboskopische Bild an, sich in der Drehrichtung der rotierenden Scheibe bezw. in der entgegengesetzten Richtung in Bewegung zu setzen; dabei dreht sich das stroboskopische Bild um so schneller, je größer der Unterschied zwischen n_1 (Glchg. 1) und der wirklichen Tourenzahl n der rotierenden Scheibe ist, bis schließlich bei einem bestimmten Werte von $n_1 - n$ die Tourenzahl des stroboskopischen Bildes so groß wird, daß das Auge es nicht mehr verfolgen kann.

Das 1 stroboskopische Hauptbild (Glchg. 1) kommt dann zustande, wenn die Streifenscheibe sich so schnell dreht, daß innerhalb der Zeit t einer halben Stromperiode oder eines Stromwechsels jeder Streifen der Scheibe um seine doppelte Breite vorgerückt ist. Der Winkel, um welchen sich die Scheibe in der angegebenen Zeit $t = \frac{1}{w}$ sek (w = Stromwechselzahl oder Frequenz des benutzten Wechselstromes) gedreht hat, ist in diesem Falle nach Fig. 2

$$4) \quad \ldots\ldots \quad \alpha = \frac{360^\circ}{z}$$

Dreht sich nun die Scheibe langsamer bezw. schneller, so ist der zugehörige Drehwinkel

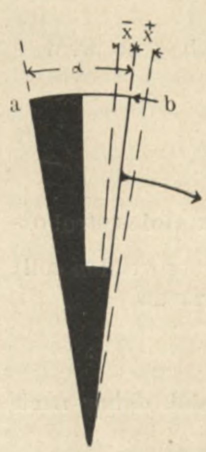


Fig. 2.

$$5) \quad \ldots\ldots \quad \alpha \mp x = \frac{360^\circ}{z} \mp x^\circ$$

Die dem Drehwinkel α (Glchg. 4) entsprechende Tourenzahl der Streifenscheibe ist nach Glchg. 1)

$$n_1 = \frac{60\,w}{z}$$

Dem Drehwinkel $\alpha \mp x$ (Glchg. 5) entspricht die Tourenzahl

$$n = \left(\frac{360^\circ}{z} \mp x^\circ\right) \cdot \frac{w \cdot 60}{360^\circ} = \frac{60\,w}{z} \mp \frac{x \cdot w}{6}$$

Der Unterschied zwischen den Tourenzahlen n_1 und n beträgt demnach

$$6) \quad \ldots\ldots \quad n_1 - n = \pm \frac{x \cdot w}{6}$$

Die Zeit, welche jeder Streifen des wandernden stroboskopischen Bildes braucht, um von a nach b zu gelangen (Fig. 2), ist

$$t_x = \frac{\alpha}{\pm x} \cdot \frac{1}{w} \text{ sek}$$

Setzt man in diese Gleichung den Wert von α aus Glchg. 4) ein, so wird

$$t_x = \pm \frac{360}{x \,.\, w \,.\, z} \text{ sek}$$

Nun ist aber die Zahl z_s der während einer Sekunde an einem festen Punkte des Raumes vorübergehenden hellen oder dunklen Streifen des stroboskopischen Bildes der rotierenden Scheibe nichts anderes als der reziproke Wert von t_x; demzufolge ist

$$7) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad z_s = \pm \frac{x \,.\, w \,.\, z}{360}$$

Derselbe Wert, bezogen auf den Zeitraum einer Minute, ist dann

$$8) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad z_m = \pm \frac{x \,.\, w \,.\, z}{6}$$

Bemerkt sei noch, daß in den Gleichungen 5—8 das positive Vorzeichen die Drehbewegung des stroboskopischen Bildes in der Drehrichtung der rotierenden Scheibe, das negative Vorzeichen dagegen die entgegengesetzte Drehrichtung bezeichnet.

Dividiert man Glchg. 8) durch Glchg. 6), so erhält man

$$9) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad \frac{z_m}{n_1 - n} = z$$

Das heißt:

„Das Verhältnis der Zahl der während einer Minute an einem festen Punkte des Raumes vorübergehenden hellen oder dunklen Streifen des 1 stroboskopischen Hauptbildes einer rotierenden Streifenscheibe zur Differenz zwischen der Tourenzahl des stillstehend erscheinenden stroboskopischen Bildes und der tatsächlichen Tourenzahl der rotierenden Scheibe ist konstant und zwar gleich der Streifenzahl der Sektorenscheibe.“

Dividiert man noch Glchg. 9) durch z, so wird

$$10) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad \frac{\frac{z_m}{z}}{n_1 - n} = 1$$

$\frac{z_m}{z}$ ist die minutliche Umdrehungszahl des stroboskopischen Bildes, welche mit „u“ bezeichnet werden soll; infolgedessen nimmt Glchg. 10) die Form an

$$11) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad u = n_1 - n$$

Der oben angeführte Satz läßt sich daher auch folgendermaßen aussprechen:

„Die Umdrehungszahl des 1 stroboskopischen Hauptbildes einer rotierenden Streifenscheibe ist gleich der Differenz zwischen der Tourenzahl des stillstehenden stroboskopischen Bildes und der tatsächlichen Tourenzahl der Scheibe.“

Alle Tourenzahlen beziehen sich, wie bereits weiter oben bemerkt worden ist, auf den Zeitraum einer Minute.

Für praktische Ermittlungen empfiehlt sich die Benutzung der Glchg. 9) (nicht der Glchg. 11), weil es bedeutend leichter ist, die während einer Minute an einer bezeichneten Stelle vorübergehenden stroboskopischen Streifen zu zählen, als die Umdrehungszahl des stroboskopischen Bildes während derselben Zeit festzustellen.

Befestigt man nun die geschilderte Sektorenscheibe mit den z schwarzen und z weißen Streifen (Fig. 1) auf der Welle eines asynchronen Wechsel- oder Drehstrommotors, dessen Polzahl p ist, so beträgt, wenn der Motor ohne Schlüpfung, d. h. also synchron laufen würde, bei der Stromwechselzahl w (pro Sekunde) seine Tourenzahl und damit auch die der Streifenscheibe

$$12) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad n_1 = \frac{60\, w}{p}$$

Wird nun die auf der Welle des Asynchronmotors sitzende Streifenscheibe mit einer Bogenlampe oder Glühlampe beleuchtet, welche an dem Motorstromkreis hängt, und setzt man ferner fest, daß das 1 stroboskopische Hauptbild der rotierenden Sektorenscheibe bei synchronem Laufe des Asynchronmotors stillstehend erscheinen soll, so ist nach Glchg. 1)

$$13) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad n_1 = \frac{60\, w}{z}$$

Aus Glchg. 12) und Glchg. 13) ergibt sich nunmehr unmittelbar

$$14) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad z = p$$

Das heißt:

„Soll das erste stroboskopische Hauptbild einer Streifenscheibe, welche auf der Welle eines Asynchronmotors sitzt und von einer Lichtquelle beleuchtet wird, die mit dem Motor an demselben Wechselstromnetz liegt, bei der Tourenzahl stillstehend erscheinen, welche der Asynchronmotor bei synchronem Laufe haben würde, so muß die Streifenzahl (z) der Scheibe gleich der Polzahl (p) des Motors sein.“

Zu beachten ist noch, daß in Glchg. 14) bei einem bestimmten Asynchronmotor z nicht mehr einen beliebigen, sondern einen ganz bestimmten festen Wert darstellt, welcher dementsprechend in der Folge als z_1 bezeichnet werden soll; Glchg. 14) lautet also dann mit dieser Bezeichnung

$$15) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad z_1 = p$$

Hat demnach die auf der Welle eines Asynchronmotors sitzende Scheibe $z_1 = p$ schwarze sowohl als weiße Sektorenstreifen, so würde, wie bereits gezeigt worden ist, im Lichte einer Bogenlampe oder Glühlampe, welche mit dem Motor an demselben Wechselstromnetze liegt, das 1 stroboskopische Hauptbild der Streifenscheibe stillstehend erscheinen, wenn der Asynchronmotor synchron, das heißt ohne Schlüpfung laufen würde. Nun hat aber in Wirklichkeit jeder Asynchronmotor eine mehr oder minder große Schlüpfung; daraus folgt, daß das 1 stroboskopische Hauptbild der auf der Welle des Asynchronmotors sitzenden Scheibe mit der Streifenzahl $z_1 = p$ (Glchg. 15) sich im entgegengesetzten Sinne der Drehrichtung des Motors bewegen muß. Aus der Tourenzahl u dieses stroboskopischen Bildes kann man nach Glchg. 11) die Zahl der Umdrehungen $n_1 - n$ ermitteln, um welche der Asynchronmotor während einer

Minute gegenüber der Tourenzahl des stillstehenden 1 stroboskopischen Hauptbildes der Streifenscheibe zurückgeblieben ist. Dieser Wert $n_1 - n$ ist aber nichts anderes als die Schlüpfung s des Motors, ausgedrückt in Umdrehungen pro Minute; es ist also

$$16) \quad \ldots\ldots \quad n_1 - n = s$$

Aus Glchg. 11) und Glchg. 16) folgt nunmehr

$$17) \quad \ldots\ldots\ldots \quad s = u$$

Das heißt:

„Die Schlüpfung eines Asynchronmotors, ausgedrückt in Umdrehungen pro Minute, ist gleich der Tourenzahl des 1 stroboskopischen Hauptbildes einer Sektorenscheibe, welche auf der Motorwelle sitzt und deren Streifenzahl gleich der Polzahl des betreffenden Motors ist.“ *)

In dieser Form ist Glchg. 17) ungeeignet zur experimentellen Ermittlung von Schlüpfungsgraden auf stroboskopischem Wege, weil es schwierig ist, die Tourenzahl des in Frage kommenden stroboskopischen Bildes während einer Minute durch unmittelbares Zählen festzustellen. Dagegen ist es, wie bereits erwähnt wurde, verhältnismäßig leicht, die Zahl z_m der während einer Minute an einer bezeichneten Stelle vorübergehenden hellen oder dunklen Streifen des 1 stroboskopischen Hauptbildes durch Zählen zu ermitteln. Nun besteht aber zwischen u, z_m und z_1 ein einfacher Zusammenhang; es ist nämlich

$$u = \frac{z_m}{z_1}$$

*) Niethammer sagt in seinem Buche: Generatoren, Motoren und Steuerapparate für elektrisch betriebene Hebe- und Transportmaschinen 1900 in der Anmerkung auf Seite 91:

„Die Schlüpfung läßt sich einfach auf folgende Weise vor Augen führen: Man steckt auf die Welle eines Asynchronmotors eine schwarze Scheibe mit weißem Kreuz. Beleuchtet man nun diese Scheibe mit einer Bogenlampe, die derselbe Wechselstrom speist, so läuft das Kreuz mit der Geschwindigkeit der Schlüpfung rückwärts gegen die eigentliche Ankerdrehung. Liefe der Motor synchron, so würde das Kreuz für das Auge stehen bleiben.“

Hierzu bemerke ich folgendes: Handelt es sich um einen vierpoligen Motor ($p = 4$), so sind die obigen Angaben richtig, da bei der geschilderten schwarzen Scheibe mit dem weißen Kreuze die Streifenzahl $z_1 = 4 = p$ ist; hat der Motor dagegen irgend eine andere Polzahl ($p = 6$, 8, 10 usw.), so sind die obigen Angaben nicht zutreffend, da nach Glchg. 15) die Streifenzahl z_1 der Scheibe gleich der Polzahl p des Asynchronmotors sein muß, wenn das 1 stroboskopische Hauptbild der rotierenden Scheibe bei der Tourenzahl $n_1 = \frac{60\,w}{p}$ stillstehend erscheinen soll.

Setzt man z. B. jene schwarze Scheibe mit dem weißen Kreuz auf die Welle eines sechspoligen Asynchronmotors und beleuchtet sie mit einer Bogenlampe, die derselbe Wechselstrom speist, so ist überhaupt kein stroboskopisches Bild sichtbar; das 1 stroboskopische Hauptbild des Kreuzes ($z_1 = 4$) erscheint nach Glchg. 1) bei der Tourenzahl $n_1 = \frac{60\,w}{4} = 15\,w$ stillstehend, während die Tourenzahl eines sechspoligen Asynchronmotors bei synchronem Laufe $n = \frac{60\,w}{6} = 10\,w$ sein würde (Glchg. 12). Theoretisch erscheint in diesem Falle eines der stroboskopischen Zwischenbilder mit dreifacher Streifenzahl, weil $\frac{n}{n_1} = \frac{2}{3}$ ist (vergl. Glchg. 3); indes ist dieses stroboskopische Bild der Scheibe bei ihrer kleinen Streifenzahl ($z_1 = 4$) im Wechselstrombogenlichte in der Regel nicht zu erkennen.

Setzt man diesen Wert in Glchg. 17) ein und erinnert sich noch daran, daß nach Glchg. 15) $z_1 = p$ ist, so erhält man die einfache Beziehung

$$18) \quad \ldots\ldots \quad s = \frac{z_m}{p} \; {}^{*)}$$

Glchg. 18) kann in dieser Form bereits zur Ermittlung kleinerer Schlüpfungsgrade benutzt werden. In der Regel wird indes die Schlüpfung nicht in Umdrehungen pro Minute ausgedrückt, sondern in Prozenten der Tourenzahl n_1 angegeben, welche der Asynchronmotor bei synchronem Laufe haben würde. Diese prozentuale Schlüpfung ist allgemein

$$19) \quad \ldots\ldots \quad s\,\% = \frac{100\,s}{n_1}$$

wo s die Schlüpfung, ausgedrückt in Umdrehungen pro Minute, und n_1 die Tourenzahl bei synchronem Laufe des Motors bezeichnet.

Nun ist aber nach Glchg. 18) $s = \frac{z_m}{p}$ und nach Glchg. 12) $n_1 = \frac{60\,w}{p}$.

Setzt man diese beiden Werte in Glchg. 19) ein, so erhält man

$$20) \quad \ldots\ldots \quad s\,\% = \frac{5\,z_m}{3\,w}$$

*) Benischke sagt in der Elektrotechnischen Zeitschrift 1899, Seite 144, 1. Spalte, Zeile 10—17:

„Hat er aber eine gewisse Schlüpfung, so wandert das stroboskopische Bild, und wenn man die Vorübergänge der stroboskopisch sichtbaren Speichen an irgend einem Punkt des Raumes während einer Minute zählt, so hat man die Anzahl der Umdrehungen, die der Motor jetzt weniger macht als bei synchronem Gange.“

Dieser Satz würde in der von mir gewählten Zeichensprache lauten

$$z_m = n_1 - n$$

Er steht in offenbarem Widerspruche mit der aufgestellten Glchg. 9).

Benischke, Annalen der Physik, 4. Folge, 5. Band, 1901 Seite 487, Zeile 26—30:

„Die Vorübergänge der schwarzen Segmente der stroboskopischen Scheibe an irgend einem festen Punkte stehen in einem einfachen Verhältnis zur Schlüpfung des Motors. Dieses Verhältnis hängt ab von der Anzahl der Segmente und der Polzahl des Motors.“

Über den tatsächlichen Wert des in Rede stehenden Verhältnisses $\frac{z_m}{s}$ (entsprechend meinen Bezeichnungen) findet sich in der betreffenden Abhandlung keine weitere diesbezügliche Angabe; übrigens steht die Charakterisierung jenes Verhältnisses im Widerspruch mit der aufgestellten Glchg. 18), nach welcher jener Wert $\frac{z_m}{s}$ nur von der Polzahl p des betreffenden Motors abhängt.

Benischke, Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, Seite 698, Spalte 3, Zeile 25—40:

„Am besten geht es, wenn man nicht einen dunklen Sektor ins Auge faßt und seine Umdrehungen zählt, sondern wenn man z. B. bei einem vierpoligen Motor eine Scheibe mit 4 Sektoren wählt und jene Stellungen zählt, wo die Arme des dunklen Sektorenkreuzes wagrecht oder lotrecht stehen. Das Ergebnis dieser Zählung hat man durch 4 zu dividieren und erhält so die Anzahl der Umdrehungen, um welche der Motor geschlüpft ist. Bei einem sechspoligen Motor verwendet man am besten eine Scheibe mit 3 Sektoren, bei einem zehnpoligen Motor eine solche mit 5 Sektoren und hat dann natürlich immer das Verhältnis der Sektoren zur Polzahl in Rechnung zu ziehen.“

Die Angaben hinsichtlich des vierpoligen Motors sind richtig (vergl. Glchg. 15), dagegen diejenigen bezüglich des sechspoligen und zehnpoligen Motors nach Glchg. 15) nicht zutreffend; ferner findet sich auch in dieser Abhandlung keine klare Angabe, in welcher Weise das genannte „Verhältnis der Sektoren zur Polzahl“ in Rechnung gezogen werden soll.

Nach dieser Gleichung hängt die Genauigkeit der stroboskopischen Schlüpfungsermittlung von der genauen Bestimmung des Wertes von z_m ab, da die Stromwechselzahl (Frequenz) w in der Regel bekannt ist oder doch mit hinreichender Genauigkeit leicht ermittelt werden kann. Der Wert von z_m muß durch Zählen festgestellt werden; da es nun schwierig ist, die Zahl der an einer bezeichneten Stelle vorübergehenden hellen oder dunklen Streifen des stroboskopischen Bildes der rotierenden Scheibe durch Zählen mit Sicherheit zu bestimmen, wenn z_m eine gewisse Grenze überschreitet, so ist es erforderlich, daß dieser Wert $z_m \leqq 150$ sei, wenn das Ergebnis der Glchg. 20) Anspruch auf Genauigkeit haben soll. Dabei sei noch bemerkt, daß es schon ziemlich anstrengend und schwierig ist, 150 Streifen mit Sicherheit während einer Minute zu zählen, umsomehr als das stroboskopische Bild der rotierenden Streifenscheibe besonders bei kleiner Polzahl des Asynchronmotors ziemlich lichtschwach ist. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, $z_m \leqq 100$ zu wählen, damit man stets in der Lage ist, mit der nötigen Ruhe und Sicherheit den Wert von z_m durch Abzählen ermitteln zu können.

Setzt man dementsprechend in Glchg. 20) $z_m \leqq 100$ und außerdem $w = 100$ (üblicher Wert der Frequenz der in Deutschland zu Beleuchtungszwecken verwendeten Wechselströme), so wird

$$s\,\% \leqq 1{,}67$$

Das heißt: Mittels einer Sektorenscheibe, die auf der Welle eines Asynchronmotors sitzt und deren Streifenzahl z_1 gleich der Polzahl p des betreffenden Motors ist, kann man bei dem angegebenen Grenzwerte von z_m höchstens Schlüpfungsgrade bis zu 1,7 % mit hinreichender Genauigkeit und Sicherheit bestimmen.

Die auf der unmittelbaren Anwendung der Glchg. 20) beruhende Methode (Benischke), Schlüpfungsgrade auf stroboskopischem Wege zu bestimmen, ist demnach in ihrer Anwendungsfähigkeit beschränkt; außerdem hat sie, wie bereits weiter oben bemerkt worden ist, den Nachteil, daß das 1 stroboskopische Hauptbild der rotierenden Streifenscheibe im allgemeinen nur bei Bogenlichtbeleuchtung gut wahrnehmbar ist, dagegen im Lichte von Glühlampen infolge der in der Regel verhältnismäßig kleinen Streifenzahl der Scheibe ($z_1 = p$) meistens überhaupt nicht zu erkennen ist.

Nach Gleichung 15) muß die Streifenzahl z_1 der unmittelbar auf der Welle des zu untersuchenden Asynchronmotors sitzenden Sektorenscheibe gleich der Polzahl p des Motors sein. Bei einem vierpoligen Motor z. B. muß $z_1 = 4$, bei einem sechspoligen Motor $z_1 = 6$, bei einem zehnpoligen Motor $z_1 = 10$ genommen werden. Nun wurde bereits weiter oben darauf hingewiesen, daß die gute Wahrnehmbarkeit stroboskopischer Erscheinungen mit der Streifenzahl der Sektorenscheibe zunimmt, so zwar, daß das 1 stroboskopische Hauptbild erst dann sowohl bei Bogenlicht- als bei Glühlampenbeleuchtung mit Sicherheit zu erkennen ist, wenn die Streifenzahl (z) der rotierenden Scheibe nicht zu klein genommen wird; aus dem angegebenen Grunde wurde empfohlen, stets $z \geqq 36$ zu wählen.

Nun ist aber in den meisten praktischen Fällen die Polzahl p des Asynchronmotors und nach Glchg. 15) damit auch $z_1 \leqq 16$; daraus ergibt sich, daß die Streifenzahl der Sektorenscheibe, welche unmittelbar auf der Welle des zu untersuchenden Motors sitzt, im allgemeinen zu klein ist, um in allen Fällen das 1 stroboskopische Hauptbild deutlich erkennen zu lassen. Hat man z. B. einen vierpoligen Motor und will aus irgend einem Grunde Glühlampen zur Beleuchtung der rotierenden Streifenscheibe verwenden, so zeigt es sich, daß in diesem Falle das 1 stroboskopische Hauptbild überhaupt nicht in Erscheinung tritt.

Ein einfaches Mittel, die Streifenzahl der rotierenden Scheibe nach Belieben vergrößern zu können, besteht darin, daß die Scheibe unter Einschaltung eines Übersetzungsverhältnisses φ von der Motorwelle aus angetrieben wird. Die Tourenzahl, die der Asynchronmotor bei synchronem Laufe haben würde, sei wiederum n_1, seine tatsächliche Tourenzahl n; in analoger Weise sei die Umdrehungszahl der mit der Übersetzung φ von der Motorwelle aus angetriebenen Sektorenscheibe bei synchronem Laufe des Asynchronmotors n_1', ihre tatsächliche Tourenzahl n'; es bezeichne ferner z_1 die Streifenzahl der Sektorenscheibe, wenn sie unmittelbar auf der Motorwelle sitzt, z_1' die Streifenzahl der Scheibe, wenn sie mit der Übersetzung φ angetrieben wird, z_m bezw. z_m' die Zahl der während einer Minute an einer markierten Stelle vorübergehenden hellen oder dunklen Streifen des 1 stroboskopischen Hauptbildes der Streifenscheibe, je nachdem diese unmittelbar auf der Motorwelle sitzt, bezw. mittels der Übersetzung φ von dieser aus angetrieben wird. Die Schlüpfung s des Motors ist nach den obigen Bezeichnungen wiederum $= n_1 - n$ (Glchg. 16).

Das 1 stroboskopische Hauptbild der mittels des Übersetzungsverhältnisses φ von der Motorwelle aus angetriebenen Streifenscheibe erscheint dem Auge stillstehend, wenn ihre Tourenzahl entsprechend der Glchg. 1)

$$21) \quad \ldots\ldots \quad n_1' = \frac{60\,w}{z_1'}$$

ist.

Nun ist aber auch

$$22) \quad \ldots\ldots \quad n_1' = n_1 \cdot \varphi$$

Nach Glchg. 1) ist $n_1 = \frac{60\,w}{z_1}$; setzt man diesen Wert in Glchg. 22) ein, so erhält man

$$23) \quad \ldots\ldots \quad n_1' = \frac{60\,w}{z_1} \cdot \varphi$$

Nunmehr ergibt sich aus Glchg. 21) und Glchg. 23)

$$24) \quad \ldots\ldots \quad z_1' = \frac{z_1}{\varphi}$$

Nach Glchg. 9) ist ferner

$$25\text{a}) \quad \ldots \quad z_m = z_1\,(n_1 - n)$$

und

$$25\text{b}) \quad \ldots \quad z_m' = z_1'\,(n_1' - n')$$

Nach Glchg. 24) ist $z_1' = \frac{z_1}{\varphi}$ und außerdem $n_1' - n' = (n_1 - n)\,\varphi$; setzt man diese beiden Werte für z_1' und $n_1' - n'$ in Glchg. 25b) ein, so erhält man

$$26) \quad . \; . \; z_m' = \frac{z_1}{\varphi}\,(n_1 - n)\,\varphi = z_1\,(n_1 - n)$$

Aus Glchg. 25a) und Glchg. 26) folgt nunmehr ohne weiteres

$$27) \quad \ldots\ldots \quad z_m' = z_m$$

Das heißt:

„Die Zahl der während einer Minute an einer bezeichneten Stelle vorübergehenden hellen oder dunklen

Streifen des 1 stroboskopischen Hauptbildes einer rotierenden Sektorenscheibe ist unabhängig von dem Übersetzungsverhältnis, welches zwischen die Streifenscheibe und die Motorwelle eingeschaltet wird."

Man kann zu demselben Ergebnis auch auf folgende Weise gelangen: Hat man einen Motor, dessen Belastung konstant gehalten wird, so stellen für diesen Motor p und s feste Werte dar; dann muß aber nach Glchg. 18) auch z_m ein fester Wert sein, ist also unabhängig von der Streifenzahl der rotierenden Sektorenscheibe und von dem Übersetzungsverhältnis zwischen der Streifenscheibe und der Motorwelle.

Demzufolge gilt Glchg. 20) nicht nur für den Fall, daß die stroboskopische Scheibe unmittelbar auf der Motorwelle sitzt, sondern auch dann, wenn sie unter Einschaltung eines beliebigen Übersetzungsverhältnisses φ angetrieben wird. Nun ist bereits weiter oben gezeigt worden, daß mittels einer Scheibe, welche unmittelbar auf der Motorwelle sitzt und deren Streifenzahl $z_1 = p$ ist, höchstens Schlüpfungsgrade bis etwa 1,7 % mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden können. Dasselbe gilt natürlich auch für die Scheibe, welche unter Einschaltung der Übersetzung φ von der Motorwelle aus angetrieben wird und deren Streifenzahl nach Glchg. 24) $z_1' = \frac{z_1}{\varphi} = \frac{p}{\varphi}$ (nach Glchg. 15 ist $z_1 = p$) ist.

Will man auf stroboskopischem Wege Schlüpfungsgrade über 1,7 % ermitteln, so muß man bedenken, daß die Streifenzahl der rotierenden Sektorenscheibe größer als z_1' sein muß, wenn bei der kleiner gewordenen Tourenzahl des Motors trotzdem das 1 stroboskopische Hauptbild der Streifenscheibe noch sichtbar bleiben soll. Setzt man z. B. auf die Welle eines vierpoligen Asynchronmotors eine Scheibe mit $z = p + 1 = 5$ schwarzen und 5 weißen Streifen, so kann man mittels dieser Scheibe bestimmte höhere Schlüpfungsgrade ermitteln. Nimmt man schließlich eine Serie von Scheiben, deren erste $z_1 = p$ schwarze und weiße Streifen hat, während jede folgende ein Streifenpaar (einen schwarzen und einen weißen Streifen) mehr besitzt als die vorhergehende, so kann man mittels dieser Serie von Scheiben eine ganze Reihe bestimmter Schlüpfungsgrade ermitteln.

Nehmen wir allgemein an, eine Scheibe mit z schwarzen und z weißen Sektorenstreifen (z bezeichnet in diesem Falle eine beliebige ganze Zahl $\geq \frac{p}{\varphi}$ und ist nicht mit den oben genannten Werten z_1 und z_1' zu verwechseln) werde von einem Asynchronmotor, dessen Polzahl p sei, mittels des Übersetzungsverhältnisses φ angetrieben; die Frequenz des benutzten Wechselstromes sei wiederum w (entsprechend der Periodenzahl $\frac{w}{2}$).

Dann ist allgemein die Schlüpfung s ausgedrückt in Umdrehungen pro Minute

$$28) \quad . \; . \; . \quad s = n_1 - n_1' \cdot \frac{1}{\varphi} \mp \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{z_m}{z}$$

In dieser Gleichung bezeichnet, wie bereits weiter oben bemerkt worden ist, n_1 die Tourenzahl, welche der Asynchronmotor bei synchronem Laufe haben würde, n_1' die Tourenzahl, bei welcher das 1 stroboskopische Hauptbild der mittels des Übersetzungsverhältnisses φ durch den Motor angetriebenen Streifenscheibe stillstehend erscheint, z_m die Zahl der während einer Minute an einer bezeichneten Stelle vorübergehenden hellen oder dunklen Streifen des 1 stroboskopischen Hauptbildes der rotierenden Scheibe und z ihre jeweilige Streifenzahl.

Nach Glchg. 12) ist $n_1 = \frac{60\,w}{p}$ und entsprechend der Glchg. 1) $n_1' = \frac{60\,w}{z}$.

Setzt man diese beiden Werte für n_1 und n_1' in Glchg. 28) ein, so erhält man

$$29) \quad . \; . \; . \quad s = \frac{60\,w}{p} - \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{60\,w}{z} \mp \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{z_m}{z}$$

Das negative bezw. das positive Vorzeichen des Wertes $\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{z_m}{z}$ in Glchg. 28) und 29) ist zu nehmen, je nachdem sich das stroboskopische Bild im Sinne der Drehrichtung der rotierenden Streifenscheibe bezw. im entgegengesetzten Sinne bewegt.

Die prozentuale Schlüpfung beträgt nun nach Glchg. 19)

$$s\,\% = \frac{100}{n_1} \left[\frac{60\,w}{p} - \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{60\,w}{z} \mp \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{z_m}{z} \right]$$

Setzt man in diese Gleichung den Wert $n_1 = \frac{60\,w}{p}$ (Glchg. 12) ein, so wird nach den entsprechenden Vereinfachungen

$$30) \quad . \; . \; . \quad s\,\% = 100 - \frac{100\,p}{\varphi \cdot z} \mp \frac{5\,z_m \cdot p}{3\,\varphi \cdot w \cdot z}$$

An dieser Stelle sei erwähnt, daß Glchg. 20) ein spezieller Fall der verallgemeinerten Form der Glchg. 30) ist und aus ihr ohne weiteres hergeleitet werden kann, wenn man $z = \frac{p}{\varphi}$ setzt. Der Unterschied zwischen beiden Gleichungen (20 und 30) besteht darin, daß im ersten Falle (Glchg. 20) die Tourenzahl n_1, welche der Asynchronmotor bei synchronem Laufe haben würde, multipliziert mit dem Übersetzungsverhältnisse φ gleich der Tourenzahl n_1' des stillstehenden 1 stroboskopischen Hauptbildes der rotierenden Streifenscheibe sein muß (vergl. Glchg. 22), während im zweiten Falle (Glchg. 30) der oben bezeichnete Wert $n_1\,\varphi \geq n_1'$ ist. Gleicherweise muß im ersten Falle $z_1 = \frac{p}{\varphi}$ sein, während es sich im zweiten Falle um eine Serie von Scheiben handelt, deren Streifenzahl $z \geq \frac{p}{\varphi}$ ist.

Die erste Scheibe der erwähnten Serie hat $z_1 = \frac{p}{\varphi}$ schwarze und weiße Streifen; es lassen sich mit ihr die zwischen den Grenzwerten $s_{1,\,max}\,\%$ und $s_{1,\,min}\,\%$ liegenden Schlüpfungsgrade ermitteln; setzt man in Glchg. 30) $z = \frac{p}{\varphi}$, so erhält man dementsprechend

$$31\text{a}) \quad . \; . \; . \quad s_{1,\,min}\,\% = -\frac{5\,z_m}{3\,w}$$

und

$$31\text{b}) \quad . \; . \; . \; . \quad s_{1,\,max}\,\% = \frac{5\,z_m}{3\,w}$$

Der Wert der Glchg. 31 a) hat keinen Sinn, da die Schlüpfung nicht negativ werden kann.

Mit der folgenden Scheibe, deren Streifenzahl $z_2 = \frac{p}{\varphi} + 1$ ist, lassen sich die Schlüpfungsgrade $s\,\%$ ermitteln, welche von den Grenzwerten $s_{2,\,min}\,\%$ und $s_{2,\,max}\,\%$ eingeschlossen sind.

Setzt man in Glchg. 30) $z = \frac{p}{\varphi} + 1$, so erhält man

$$32a) \quad . \quad . \quad s_{2,\,min}\,\% = 100 - \frac{100\,p}{p+\varphi} - \frac{5\,z_m \cdot p}{3\,w\,(p+\varphi)}$$

und

$$32b) \quad . \quad . \quad s_{2,\,max}\,\% = 100 - \frac{100\,p}{p+\varphi} + \frac{5\,z_m \cdot p}{3\,w\,(p+\varphi)}$$

Soll nun mittels der beiden ersten Scheiben jener Serie die Ermittlung aller zwischen 0% und $s_{2,\,max}\,\%$ liegenden Schlüpfungsgrade möglich sein, so muß

$$s_{2,\,min}\,\% = s_{1,\,max}\,\%$$

sein.

Setzt man in diese Gleichung die entsprechenden Werte aus Glchg. 32a) und Glchg. 31b) ein, so erhält man

$$100 - \frac{100\,p}{p+\varphi} - \frac{5\,z_m \cdot p}{3\,w\,(p+\varphi)} = \frac{5\,z_m}{3\,w}$$

Entwickelt man nun diese Gleichung nach φ, so ergibt sich die Beziehung

$$33) \quad . \quad . \quad . \quad \varphi = \frac{10\,z_m}{300\,w - 5\,z_m} \cdot p$$

Bezüglich der oberen Grenze von z_m wurde bereits darauf aufmerksam gemacht, daß auf alle Fälle $z_m \leqq 150$ sein muß, weil jener Wert nur durch unmittelbares Abzählen festgestellt werden kann.

Setzt man dementsprechend in Glchg. 33) $z_m \leqq 150$, so erhält man

$$34) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \varphi \leqq \frac{10\,p}{2\,w - 5}$$

Nun ist die Frequenz der in Deutschland zu Beleuchtungszwecken verwendeten Wechselströme fast allgemein $w \cong 100$ pro Sekunde (entsprechend der Periodenzahl $\nu \cong 50$).

Setzt man daher in Glchg. 34) noch $w = 100$, so wird

$$35) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \varphi \leqq \frac{2}{39}\,p$$

das heißt: „Das Übersetzungsverhältnis, mittels dessen die Streifenscheibe durch den Motor angetrieben wird, muß bei der angegebenen Frequenz auf alle Fälle $\varphi \leqq \frac{2}{39}\,p$ sein, wenn mit der geschilderten Serie von Scheiben eine fortlaufende Ermittlung aller Schlüpfungsgrade möglich sein soll."

Nun ist bereits oben bemerkt worden, daß eine gute Beobachtung des stroboskopischen Bildes der rotierenden Streifenscheibe sowohl im Bogen- als im Glühlampenlichte nur dann möglich ist, wenn die Streifenzahl der Scheibe verhältnismäßig groß ist; aus diesem Grunde ist empfohlen worden, z stets $\geqq 36$ zu wählen.

Mit Rücksicht auf diese Angabe wurde die Streifenzahl der ersten Scheibe jener oben geschilderten Serie $z_1 = 40$ gewählt. Nun gilt aber für diese Scheibe die Beziehung

$$36) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad z_1 = \frac{p}{\varphi}$$

Setzt man in dieser Gleichung $z_1 = 40$ und entwickelt nach φ, so erhält man

$$37) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \varphi = \frac{p}{40}$$

Dieser Wert von φ genügt, wie man sofort erkennt, der Bedingung der Glchg. 35), kann also ohne weiteres beibehalten werden.

Setzt man nun rückwärts diesen Wert von φ in Glchg. 33) ein und entwickelt nach z_m, so ergibt sich

$$38) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad z_m = \frac{20}{27}\,w$$

Da nun die Stromwechselzahl $w \cong 100$ pro Sekunde ist, wird nach Glchg. 38)

$$39) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad z_m \cong \frac{20}{27} \cdot 100 \cong 74$$

das heißt: „Mittels einer Serie von Streifenscheiben, die unter Einschaltung des Übersetzungsverhältnisses $\varphi = \frac{p}{40}$ (Glchg. 37) durch einen Asynchronmotor angetrieben werden, ist es möglich, beliebig große Schlüpfungsgrade dieses Motors zu bestimmen, ohne daß die Zahl der während einer Minute zu zählenden hellen oder dunklen stroboskopischen Streifen größer als 74 wird ($z_m \leqq 74$)."

Die angegebene Methode bleibt selbstverständlich in derselben Weise verwendbar, wenn $w < 100$ wird; es ändert sich nur entsprechend der Grenzwert von z_m (Glchg. 38); wird dagegen $w > 100$ (was im allgemeinen selten der Fall ist), so bleibt auch dann noch die Methode so lange verwendbar, als $z_m \leqq 150$ ist, da bis zu dieser Grenze der Wert von z_m bei gespannter Aufmerksamkeit und nach einiger Übung noch durch Zählen festgestellt werden kann. Man findet also den oberen Grenzwert von w, bis zu welchem die angegebene Methode sich verwenden läßt, wenn man in Glchg. 38) $z_m = 150$ setzt; auf diese Weise findet man $w \cong 200$, das heißt: Mittels der geschilderten Serie von Scheiben und des Übersetzungsverhältnisses $\varphi = \frac{p}{40}$ kann man alle Schlüpfungsgrade eines Asynchronmotors von beliebiger Polzahl ermitteln, wenn die Frequenz des benutzten Wechselstroms $w \leqq 200$ pro Sekunde ist (entsprechend der Periodenzahl $\nu \leqq 100$).

Setzt man den gewählten Wert $\varphi = \frac{p}{40}$ (Glchg. 37) in Glchg. 30) ein, so erhält man

$$40) \quad . \quad . \quad s\,\% = 100 - \frac{4000}{z} \mp \frac{200\,z_m}{3\,w \cdot z}$$

Bezüglich der Wahl des Vorzeichens bei dem letzten Gliede dieser Gleichung gilt dasselbe, was im Anschluß an Glchg. 28) und 29) gesagt worden ist.

Hinsichtlich der Genauigkeit der entwickelten Methode zur stroboskopischen Ermittlung beliebig großer Schlüpfungsgrade asynchroner Wechsel- und Drehstrommotoren sei noch folgendes bemerkt: Die Frequenz w des in Frage kommenden Wechselstromes ist in der Regel bekannt (in Mainz, wo ich meine praktischen Versuche angestellt habe, war z. B. $w = 103$) oder kann leicht in Erfahrung gebracht werden; z ist für jede einzelne Scheibe eine feste Zahl. Somit hängt die Genauigkeit der Schlüpfungsmessung nach der angegebenen Methode (Glchg. 40) im wesentlichen von der genauen Ermittlung des Wertes von z_m ab.

Da nun in der Regel $z_m \leqq 74$ ist, entsprechend $w = 100$ (Glchg. 38) und selbst für $w = 100 - 200$ auf alle Fälle $z_m \leqq 150$ bleiben muß, ist man stets in der Lage den Wert von z_m durch unmittelbares Abzählen mit Sicherheit bis auf einen weißen oder schwarzen Streifen genau festzustellen.

Damit wird der Ungenauigkeitsgrad η_s der Schlüpfungsmessung, ausgedrückt in Prozenten der Tourenzahl n_1, welche der Asynchronmotor bei synchronem Laufe haben würde

$$41) \quad \eta_s \leq \frac{1 \cdot 100}{\varphi \cdot z \cdot n_1}$$

Nach Glchg. 37) ist $\varphi = \frac{p}{40}$ und nach Glchg. 12) $n_1 = \frac{60\,w}{p}$; setzt man diese beiden Werte in Glchg. 41) ein, so wird

$$42) \quad \eta_s \leq \frac{200}{3\,w \cdot z}$$

Man erkennt aus dieser Gleichung, daß der Ungenauigkeitsgrad η_s um so kleiner, daß also die Schlüpfungsmessung selbst um so genauer sein wird, je größer die Streifenzahl z der rotierenden Sektorenscheibe ist.

Um die praktische Ermittlung von Schlüpfungsgraden asynchroner Wechsel- und Drehstrommotoren nach der entwickelten stroboskopischen Methode möglichst einfach und übersichtlich zu gestalten, sind die ersten Scheiben jener oben geschilderten Serie, mittels deren man beliebig große Schlüpfungsgrade bis zu 20% bestimmen kann, tabellarisch zusammengestellt worden. Die auf diese Weise entstandene Tabelle I kann beliebig weit fortgeführt werden; sie wurde indes bei $s = 20\%$ abgebrochen, weil in der Praxis selten größere Schlüpfungsgrade vorkommen.*)

In Spalte 1 der Tabelle I befinden sich die einzelnen Scheiben jener oben geschilderten Serie mit Angabe ihrer Streifenzahl z; Spalte 2 gibt die Grenzwerte $s_{min}\,\%$ und $s_{max}\,\%$ der Schlüpfungsgrade an, welche mit den einzelnen Scheiben ermittelt werden können ($z_m \leq 74$ pro Minute); Spalte 3 enthält die Formeln, in welche die Werte von z_m (durch Abzählen festgestellt) und w eingesetzt werden müssen, um die prozentuale Schlüpfung $s\,\%$ zu erhalten; diese Formeln sind dadurch entstanden, daß man in Glchg. 40) die betreffenden Werte von z (40 — 50) einsetzt. Hinsichtlich des Vorzeichens gilt dasselbe, was im Anschluß an die Gleichungen 28) und 29) bemerkt wurde: Es ist also das negative bezw. das positive Vorzeichen des Wertes $\frac{z_m}{w}$ zu nehmen, je nachdem sich das stroboskopische Bild in der Drehrichtung der rotierenden Streifenscheibe bezw. in der entgegengesetzten Richtung bewegt. Spalte 4 der Tabelle I enthält die den Schlüpfungsmessungen mit den einzelnen Scheiben entsprechenden Ungenauigkeitsgrade, gibt also an, bis auf wieviel Prozente die ermittelten prozentualen Schlüpfungsgrade richtig sind. Man erkennt aus den Zahlenwerten dieser Spalte, daß die Schlüpfungsmessungen nach der entwickelten stroboskopischen Methode außerordentlich genau sind.

Das Übersetzungsverhältnis, mittels dessen der Antrieb der Streifenscheiben von der Motorwelle aus erfolgen muß, beträgt nach Glchg. 37) für alle Scheiben der angegebenen Serie (Tabelle I) $\varphi = \frac{p}{40}$. Ist z. B. die Polzahl des zu untersuchenden Asynchronmotors

$$43a) \quad p = 4,\ 6,\ 8,\ 10,\ 12,\ 16 \text{ usw.}$$

so muß das entsprechende Übersetzungsverhältnis

$$43b) \quad \varphi = 1/10,\ 3/20,\ 1/5,\ 1/4,\ 3/10,\ 2/5 \text{ usw.}$$

sein.

Auf Grund der Resultate der obigen theoretischen Entwicklungen habe ich nun einen Apparat entworfen, mittels dessen man nach der erläuterten stroboskopischen Methode beliebig große Schlüpfungsgrade asynchroner Wechsel- und Drehstrommotoren in einfacher Weise ermitteln kann.

1	2	3	4
Streifenzahl der Scheibe	Grenzwerte der Schlüpfungsgrade in % für $z_m \leq 74$	Prozentuale Schlüpfung	Ungenauigkeitsgrad
z	$s_{min}\,\% — s_{max}\,\%$	$s\,\%$	η_s
40	$\frac{123{,}3}{w}$	$1{,}67\,\frac{z_m}{w}$	$1/60\,\%$
41	$2{,}44 \mp \frac{120{,}3}{w}$	$2{,}44 \mp 1{,}63\,\frac{z_m}{w}$	$2/123\,\%$
42	$4{,}76 \mp \frac{117{,}5}{w}$	$4{,}76 \mp 1{,}59\,\frac{z_m}{w}$	$1/63\,\%$
43	$6{,}98 \mp \frac{114{,}7}{w}$	$6{,}98 \mp 1{,}55\,\frac{z_m}{w}$	$2/129\,\%$
44	$9{,}09 \mp \frac{112{,}1}{w}$	$9{,}09 \mp 1{,}52\,\frac{z_m}{w}$	$1/66\,\%$
45	$11{,}11 \mp \frac{109{,}6}{w}$	$11{,}11 \mp 1{,}48\,\frac{z_m}{w}$	$2/135\,\%$
46	$13{,}04 \mp \frac{107{,}2}{w}$	$13{,}04 \mp 1{,}45\,\frac{z_m}{w}$	$1/69\,\%$
47	$14{,}89 \mp \frac{105{,}0}{w}$	$14{,}89 \mp 1{,}42\,\frac{z_m}{w}$	$2/141\,\%$
48	$16{,}67 \mp \frac{102{,}8}{w}$	$16{,}67 \mp 1{,}39\,\frac{z_m}{w}$	$1/72\,\%$
49	$18{,}37 \mp \frac{100{,}7}{w}$	$18{,}37 \mp 1{,}36\,\frac{z_m}{w}$	$2/147\,\%$
50	$20{,}00 \mp \frac{98{,}7}{w}$	$20{,}00 \mp 1{,}33\,\frac{z_m}{w}$	$1/75\,\%$

Tabelle I.

Tafel I zeigt den entworfenen Schlüpfungsmesser mit der ersten Scheibe ($z = 40$) der oben geschilderten Serie (Tabelle I); A ist die Vorderansicht, C die Rückansicht des Apparates, B der senkrechte Mittelschnitt $X — X$.

Die Streifenscheiben a (Kartonpapier), welche zur Hervorrufung der stroboskopischen Bilder dienen, werden mittels zweier Reißnägel b auf der Holzscheibe c des Apparates befestigt; diese ist mit der Messingplatte e verbunden, welche ihrerseits auf die Büchse f gelötet ist. Auf derselben Büchse f sitzt das auswechselbare Zahnrad g, dessen Drehbewegung durch zwei kleine Keilfedern h auf die Büchse f und damit auch auf die Holzscheibe c und die Streifenscheibe a

*) Vergl. Niethammer, Generatoren, Motoren und Steuerapparate für elektrisch betriebene Hebe- und Transportmaschinen, 1900, Seite 112.

übertragen wird. Die Verschlußmutter i verhindert beim Auswechseln der Streifenscheiben (siehe weiter unten!), daß das Zahnrad g von der Büchse f herunterrutscht. Die Büchse f läuft auf dem Drehzapfen k, welcher in dem Schlitze l des Lagerstühlchens m in verschiedenen Höhen eingestellt werden kann. In das Zahnrad g greift der kleine Trieb n, welcher auf dem einen Ende der Welle o—o sitzt; diese trägt an ihrem anderen Ende eine ausbalanzierte Schlitzkurbel r, welche auf irgend eine Weise durch die Welle des zu untersuchenden Asynchronmotors zwangsläufig in Umdrehung versetzt wird.

Um für Motoren verschiedener Polzahl stets das einmal gewählte Übersetzungsverhältnis $\varphi = \frac{p}{40}$ (Glchg. 37) herstellen zu können, besitzt der Apparat einen Satz von Zahnrädern *(I—VI)*, welche den in der Praxis am häufigsten vorkommenden Werten von p (4, 6, 8, 10, 12, 16) entsprechen. Die Durchmesser $d_I - d_{VI}$ und die Zähnezahlen $z_I - z_{VI}$ dieser Zahnräder *I—VI* (Tafel I) bestimmen sich aus dem Durchmesser d_n und der Zähnezahl z_n des Triebes n ($d_n = 6$ mm, $z_n = 12$) und dem der jeweiligen Polzahl p des Motors entsprechenden Werte von φ (Glchg. 43a und 43b). In Tabelle II sind die zusammengehörigen Werte von p, φ, d und z übersichtlich zusammengestellt worden. Der Zahnrädersatz des Apparates (Tafel I) entspricht dieser Tabelle II. Auf jedem einzelnen Zahnrade ist die Polzahl p, zu welcher es gehört, vermerkt.

p	φ	$d_I - d_{VI}$ mm	$z_I - z_{VI}$
4	$^1/_{10}$	60	120
6	$^3/_{20}$	40	80
8	$^1/_5$	30	60
10	$^1/_4$	24	48
12	$^3/_{10}$	20	40
16	$^2/_5$	15	30

Tabelle II.

Soll mittels des entworfenen Apparates die Schlüpfung eines Asynchronmotors bestimmt werden, so bringt man zunächst das der Polzahl des Motors entsprechende Zahnrad g des Satzes von Tafel I (die Polzahl ist auf jedem Zahnrade vermerkt) auf die Büchse f und zwar in folgender Weise: „Man entfernt die Rändelmutter t, zieht die Büchse f an der vorstehenden Hülse samt dem daraufsitzenden Zahnrade g, der Holzscheibe c und der Streifenscheibe a von dem Drehzapfen k ab, löst die Verschlußmutter i, entfernt das gerade auf der Büchse befindliche Zahnrad, schiebt das richtige Zahnrad g (siehe oben) auf und zieht die Verschlußmutter i wieder an. Nun bringt man die Büchse f wieder auf den Drehzapfen k und verschließt diesen mit der Mutter t. Der Drehzapfen ist als Distanzbolzen ausgebildet, sodaß die Büchse f durch das Anziehen der Mutter t nicht festgeklemmt werden kann. Jetzt löst man die Mutter u und verschiebt den Drehzapfen k derart in dem Schlitze l des Lagerstühlchens m, daß die beiden Zahnräder g und n richtig ineinander eingreifen. Zur Erleichterung dieser Einstellung sind auf der Rückseite des Lagerstühlchens m Marken (4, 6, 8, 10, 12, 16) aufgetragen (Tafel I, C), welche die Höhen angeben, in welchen sich die Achse des Drehzapfens k bei den betreffenden Werten von p (4, 6, 8, 10, 12, 16) bezw. bei dem betreffenden Zahnrade g *(I—VI)* befinden muß. Untersucht man z. B. einen vierpoligen Motor (entsprechend der Abbildung auf Tafel I), so muß die Achse des Drehzapfens k in der Höhe der Marken 4 — 4 stehen; bei einem zehnpoligen Motor ($p = 10$) muß sie an den Marken 10—10 sein. Ist der Drehzapfen auf die angegebene Weise richtig justiert, so wird die Mutter u angezogen und damit der Drehzapfen k festgestellt. Nunmehr ist der Apparat gebrauchsfertig.

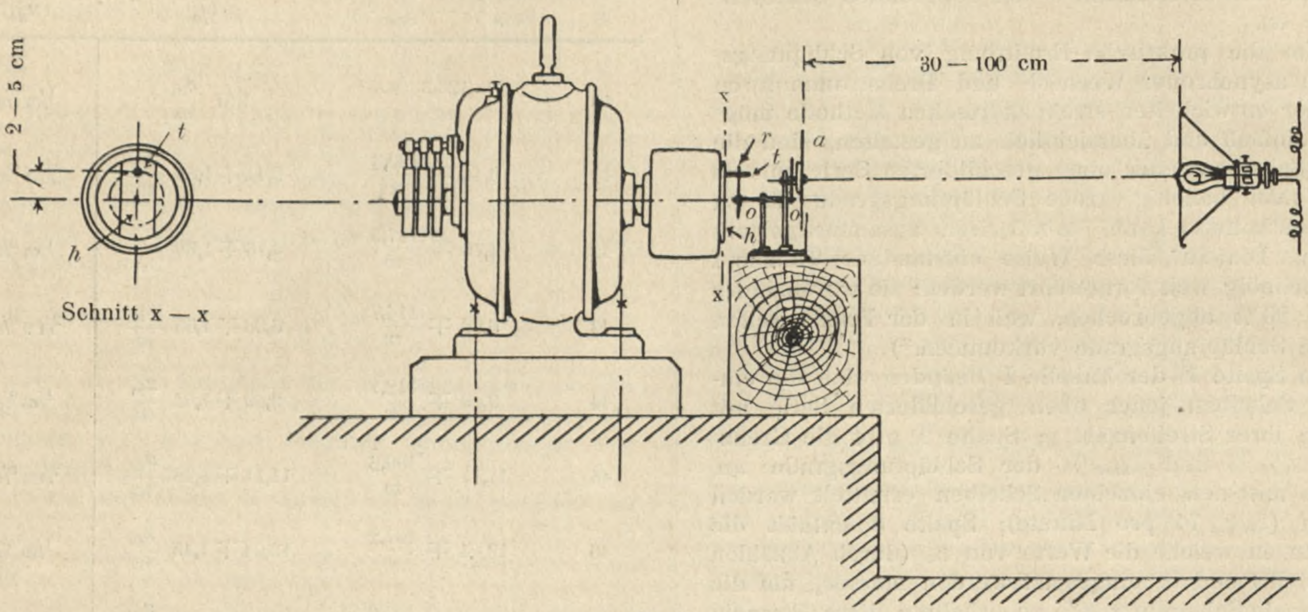


Fig. 3.

Die Aufstellung des Schlüpfungsmessers vor dem zu untersuchenden Motor erfolgt am besten auf einer passenden Holzunterlage, auf welche der Apparat unter Benutzung der beiden Bohrungen v (Tafel I) mittels zweier Holzschrauben in der richtigen Stellung (siehe weiter unten) unverrückbar befestigt wird. Fig. 3 zeigt die schematische Anordnung der Aufstellung des Schlüpfungsmessers. An dem Motor selbst wird parallel zu seiner Welle ein Eisenstift t ($\delta \simeq 5$ mm $\varnothing$) derart angebracht, daß er in radialer Richtung etwa 2—5 cm von der Achse der Motorwelle absteht (vergl. Fig. 3, Schnitt $x - x$). Hat der Motor eine Riemenscheibe, so keilt man zweckmäßigerweise in diese ein Stück Holz h (Fig. 3), in welches zuvor in dem angegebenen Abstande von der Achse der Motorwelle der Eisenstift t eingeschlagen worden ist. Nunmehr wird der Schlüpfungsmesser so vor dem zu untersuchenden Motor aufgestellt, daß der Stift t in den Schlitz der Kurbel r eingreift und die Mittellinie der Motorwelle mit derjenigen der Antriebswelle $o - o$ des Apparates in einer Geraden liegt. Da t sich in radialer Richtung in dem Schlitze der Kurbel r bewegen kann, ist es streng genommen nicht erforderlich, daß die Achsen der Motorwelle und der Welle $o - o$ genau zusammenfallen; es empfiehlt sich aber trotzdem, den Apparat so aufzustellen, daß sie ziemlich genau in einer Geraden liegen, weil in dieser Stellung der Schlüpfungsmesser naturgemäß am ruhigsten läuft. Zur Beleuchtung der Scheibe a des Apparates muß eine Lichtquelle benutzt werden, welche mit dem zu untersuchenden Motor aus demselben Wechselstromnetze gespeist wird; dabei sei auf das verwiesen, was zu Anfang dieser Zeilen bezüglich der Wahrnehmbarkeit stroboskopischer Erscheinungen bei den verschiedenen mit Wechselstrom betriebenen Lichtarten gesagt worden ist. Darnach eignet sich am besten zur Beleuchtung der stroboskopischen Scheibe des Schlüpfungsmessers irgend eine Wechselstrombogenlampe oder eine Wechselstromglühlampe von geringer Leuchtkraft (10—16 NK). Bei meinen Versuchen benutzte ich in der Regel eine Glühlampe von 16 NK. Im allgemeinen empfiehlt sich, besonders bei kleinen Stromnetzen, die Verwendung einer Glühlampe (oder von mehreren Glühlampen) zur Beleuchtung der rotierenden Streifenscheibe des Schlüpfungsmessers, weil der geringe Energieverbrauch einer solchen Glühlampe gegenüber dem verhältnismäßig großen Strombedarf einer Bogenlampe keine wesentliche Rückwirkung auf die Stromerzeugermaschine auszuüben vermag. Die Glühlampe wird nach Fig. 3 in einer Entfernung von 30—100 cm, je nach dem mehr oder weniger großen Einfluß der störenden Beleuchtung etwa vorhandener kontinuierlicher Lichtquellen (Tageslicht, Gaslicht usw.) vor der rotierenden Streifenscheibe a des Schlüpfungsmessers aufgestellt.

Nunmehr kann man den Motor in Gang setzen und bringt, nachdem er seine normale Tourenzahl erreicht hat, die erste Scheibe ($z_1 = 40$) der Serie von Tabelle I auf den Apparat. Es erscheint dann in der Regel bereits bei dieser Scheibe, vorausgesetzt, daß die Motorschlüpfung nicht allzu groß ist, das stroboskopische Hauptbild, welches mit einer der Größe der Motorschlüpfung entsprechenden Tourenzahl rotiert. Jetzt versucht man die Zahl z_m der während einer Minute an dem Zeiger w (Tafel I) des Apparates vorübergehenden hellen oder dunklen stroboskopischen Streifen durch Abzählen festzustellen. Dreht sich das stroboskopische Bild zu schnell, oder ist es überhaupt noch nicht sichtbar, so bringt man die folgende Scheibe der Serie ($z_2 = 41$) auf den Schlüpfungsmesser und fährt in dieser Weise fort, bis bei einer bestimmten Scheibe die Zahl z_m der während einer Minute an dem Zeiger w (Tafel I) vorüberwandernden hellen oder dunklen stroboskopischen Streifen sich mit Sicherheit durch Abzählen feststellen läßt. Nach den obigen theoretischen Entwicklungen muß für jede beliebige Tourenzahl eines Asynchronmotors, also auch für jeden beliebigen Schlüpfungsgrad desselben eine Scheibe in der Serie von Tabelle I vorhanden sein, für welche $z_m \leq 74$ ist. Man ist also stets in der Lage, mit dem entworfenen Schlüpfungsmesser (bezw. mit der Scheibenserie von Tabelle I) für eine Scheibe den Wert von z_m mit Leichtigkeit und absoluter Sicherheit durch Abzählen zu ermitteln.

Bemerkt sei noch, daß das Aufbringen bezw. Auswechseln der einzelnen Streifenscheiben des Apparates während des Betriebes, d. h. ohne daß der Motor abgestellt zu werden braucht, vorgenommen wird und zwar in folgender Weise: Man entfernt die Mutter t, zieht die Büchse f an der vorstehenden Hülse samt der Streifenscheibe a (Tafel I) von dem Drehzapfen k ab, steckt die gewünschte Streifenscheibe auf die Holzscheibe c, schiebt die Büchse f mit der aufgesetzten bezw. ausgewechselten Streifenscheibe a wieder auf den Drehzapfen k und bringt die Mutter t davor; zieht man diese jetzt an, so wird dadurch das Zahnrad g und damit auch die Streifenscheibe a wieder selbsttätig eingerückt. Beim Auswechseln der Streifenscheiben wird der Zeiger w zur Seite gedreht.

Den auf die oben angegebene Weise bestimmten Wert von z_m setzt man nun mit dem bekannten oder zuvor ermittelten Werte von w in die der jeweiligen Scheibe entsprechende Formel für $s\,\%$ (Tabelle I, Spalte 3) ein und hat damit unmittelbar die prozentuale Schlüpfung des untersuchten Asynchronmotors. Bezüglich des Vorzeichens des Wertes $\frac{z_m}{w}$ in Tabelle I, Spalte 3 sei wiederholt, daß das negative bezw. das positive Vorzeichen dieses Wertes zu nehmen ist, je nachdem das stroboskopische Bild der rotierenden Streifenscheibe sich in der Drehrichtung derselben bezw. in der entgegengesetzten Richtung bewegt.

Der Kraftbedarf für den Betrieb des entworfenen Schlüpfungsmessers ist bei guter Ausführung des Apparates so gering, daß sich keine Rückwirkung auf die Tourenzahl des Motors bezw. den Wert seiner Schlüpfung selbst bei Motoren von weniger als $^1/_8$ PS bemerkbar macht.

Zum Schlusse erwähne ich noch, daß man dem geschilderten Schlüpfungsmesser auch eine derartige Form geben kann, daß man den Apparat ähnlich wie einen gewöhnlichen Tourenzähler mit der Hand an die Motorwelle andrückt. Zu diesem Zwecke ist es nur erforderlich, die Welle $o - o$ des Schlüpfungsmessers (Tafel I) an Stelle der Kurbel r mit einer kantigen Spitze zu versehen und dem Apparat eine zweckmäßige Handhabe zu geben; die Motorwelle muß dann natürlich eine zentrische Vertiefung haben, in welche die kantige Spitze der Welle $o - o$ eingreifen kann. Ein wesentlicher Nachteil dieser Form des Schlüpfungsmessers würde aber darin bestehen, daß durch das Andrücken des Apparates an die Motorwelle auf diese ein Druck in achsialer Richtung ausgeübt wird, welcher bei kleinen und schnellaufenden Motoren eine merkliche Vergrößerung des wirklichen Wertes ihrer Schlüpfung hervorrufen kann.

Zur Vermeidung dieses Übelstandes, welcher zu Angaben des Apparates führen kann, die nicht den wirklichen Verhältnissen entsprechen, erhielt der entworfene Schlüpfungsmesser der Tafel I eine derartige Form, daß er keinen achsialen Druck auf die Welle des Motors auszuüben vermag.

Nachtrag.

Bei den bisherigen Entwicklungen ist angenommen bezw. vorausgesetzt worden, daß die Frequenz w des benutzten Wechselstroms bekannt sei. Es kann aber auch vorkommen, daß man diesen Wert nicht genau kennt, oder daß die Ermittlung desselben besondere Nachforschungen erfordert. In diesem Falle muß der Wert von w vor der eigentlichen Schlüpfungsmessung nach irgend einer Methode bestimmt werden. Dazu kann man in einfacher Weise den entworfenen Schlüpfungsmesser bezw. die Schlüpfungsmessung selbst benutzen. Dabei sei darauf aufmerksam gemacht, daß nach der anzugebenden Methode keine besondere Ermittlung des Wertes w vor der eigentlichen Schlüpfungsmessung erforderlich ist, vielmehr wird w mittels der Schlüpfungsmessung selbst bezw. aus zwei unmittelbar hintereinander ausgeführten Schlüpfungsmessungen berechnet.

Nehmen wir an, die Tourenzahl der rotierenden Streifenscheibe des Schlüpfungsmessers, welcher nach Fig. 3 von einem Asynchronmotor angetrieben werde, sei n_x. Bezeichnet man ferner die Streifenzahl der Scheibe, deren erstes stroboskopisches Hauptbild bei der angegebenen Tourenzahl n_x stillstehend erscheinen würde, mit z_x, so gilt nach Glchg. 1) die allgemeine Beziehung

$$n_x = \frac{60\,w}{z_x}$$

Läuft die Scheibe des Schlüpfungsmessers also mit der konstanten Tourenzahl n_x, so müßte ihre Streifenzahl beim Stillstehen ihres ersten stroboskopischen Hauptbildes

$$44) \quad \ldots\ldots \quad z_x = \frac{60\,w}{n_x}$$

sein.

Da nun n_x ein beliebiger Wert sein kann, so wird z_x im allgemeinen keine ganze Zahl sein, das heißt, es läßt sich nicht für jede beliebige Tourenzahl n_x eine Streifenscheibe der Serie von Tabelle I finden, bei welcher das erste stroboskopische Hauptbild stillstehend erscheinen würde.

Dagegen kann man mit Bestimmtheit sagen, daß der Wert von z_x (Glchg. 44) zwischen zwei Werten z der in der Spalte 1 der Tabelle I angeführten fortlaufenden Serie von Streifenscheiben liegen muß, wenn der Schlüpfungsmesser durch einen beliebigen Asynchronmotor angetrieben wird. Nehmen wir an, z_x liege zwischen den Zahlenwerten z und $z+1$; es ist also in diesem Falle

$$45) \quad \ldots\ldots \quad z < z_x < z+1$$

Wendet man nun Glchg. 1 sinngemäß auf z, z_x und $z+1$ an, so erhält man

$$\frac{60\,w}{n_z} < \frac{60\,w}{n_x} < \frac{60\,w}{n_{z+1}}$$

oder was dasselbe ist

$$46) \quad \ldots\ldots \quad n_{z+1} < n_x < n_z$$

das heißt: Die Tourenzahl n_x der rotierenden Holzscheibe c (Tafel I) des Schlüpfungsmessers ist größer als die Tourenzahl n_{z+1} und kleiner als die Tourenzahl n_z, das sind die Tourenzahlen, bei denen die ersten stroboskopischen Hauptbilder der beiden Scheiben mit den Streifenzahlen $z+1$ und z stillstehend erscheinen würden.

Aus der Ungleichung 46) folgt ferner unter Berücksichtigung dessen, was weiter oben bezüglich der Drehrichtung des ersten stroboskopischen Hauptbildes gesagt worden ist, daß, wenn man die Scheiben mit der Streifenzahl z bezw. $z+1$ auf die mit n_x Touren laufende Holzscheibe des Schlüpfungsmessers setzt, das stroboskopische Hauptbild der ersten Scheibe (Streifenzahl z) sich entgegengesetzt ihrer Drehrichtung bewegen muß ($n_x < n_z$), während bei der zweiten Scheibe (Streifenzahl $z+1$) das stroboskopische Bild im Sinne ihrer Drehrichtung rotiert ($n_x > n_{z+1}$). Für jede beliebige Tourenzahl n_x der Holzscheibe des Schlüpfungsmessers und damit auch für jede beliebige Tourenzahl des den Apparat antreibenden Asynchronmotors ist man in der Lage, zwei aufeinanderfolgende Scheiben der Serie von Tabelle I, Spalte 1, zu bezeichnen, bei denen sich die ersten stroboskopischen Hauptbilder in entgegengesetzter Richtung drehen. Die Streifenzahl dieser beiden speziellen Scheiben sei auch im folgenden mit z und $z+1$ bezeichnet; die Zahl der stroboskopischen Streifen, welche während einer Minute an einer markierten Stelle des Raumes vorübergehen, sei bei der ersten Scheibe (Streifenzahl z) $= z_{m,z}$ und bei der zweiten Scheibe (Streifenzahl $z+1$) $= z_{m,z+1}$.

Denkt man sich nun die Schlüpfung $s\,\%$ des Asynchronmotors mit der ersten Scheibe (Streifenzahl z) ermittelt, so ist nach Glchg. 40)

$$47) \quad . \ . \quad s\,\% = 100 - \frac{4000}{z} \underset{(-)}{+} \frac{200\,z_{m,z}}{3\,w\,.\,z}$$

Das positive Vorzeichen von $z_{m,z}$ ist zu nehmen, weil das stroboskopische Bild dieser Scheibe (Streifenzahl z) sich entgegengesetzt ihrer Drehrichtung bewegt.

Denkt man sich nun zum zweiten Male unmittelbar nach der ersten Messung die Schlüpfung $s\,\%$ des Asynchronmotors ermittelt, diesmal aber mit der zweiten Scheibe (Streifenzahl $z+1$), so ist wiederum nach Glchg. 40)

$$48) \quad . \ . \quad s\,\% = 100 - \frac{4000}{z+1} \underset{(+)}{-} \frac{200\,z_{m,z+1}}{3\,w\,(z+1)}$$

Das negative Vorzeichen von $z_{m,z+1}$ ist zu nehmen, weil das stroboskopische Bild der zweiten Scheibe (Streifenzahl $z+1$) sich im Sinne ihrer Drehrichtung bewegt.

Ist nun die Belastung des Asynchronmotors unverändert geblieben und führt man die Bestimmung von $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ unmittelbar nacheinander aus, so muß in beiden Fällen der mit Hilfe jener beiden Scheiben (Streifenzahl z und $z+1$) ermittelte Wert der Motorschlüpfung derselbe sein.

Setzt man demzufolge Glchg. 47) = Glchg. 48), so erhält man

$$49)\ .\ 100-\frac{4000}{z}+\frac{200\,z_{m,z}}{3\,w\,.\,z}=100-\frac{4000}{z+1}-\frac{200\,z_{m,z+1}}{3\,w\,(z+1)}$$

Bekannt sind in dieser Gleichung die Werte z, $z+1$, $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$; als Unbekannte erscheint w. Löst man nun Glchg. 49) auf und entwickelt nach w, so erhält man die einfache Beziehung

$$50)\ .\ .\quad w=\frac{1}{60}\left[z\,.\,z_{m,z+1}+(z+1)\,.\,z_{m,z}\right]$$

Setzt man nunmehr den auf die angegebene Weise ermittelten Wert w in eine der beiden Gleichungen 47) oder 48) ein — oder was dasselbe ist, in die zu den beiden Scheiben mit der Streifenzahl z und $z+1$ gehörigen Formeln für $s\,\%$ (Tabelle I, Spalte 3) —, so hat man den genauen Zahlenwert der prozentualen Schlüpfung des untersuchten Asynchronmotors.

Die Genauigkeit des auf diese Weise bestimmten Wertes hängt natürlich von der genauen Feststellung der beiden Werte $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ ab; es soll nun zunächst gezeigt werden, daß es nach der entwickelten Methode stets möglich ist, jene beiden Werte ($z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$) durch Abzählen mit Sicherheit bis auf einen Streifen genau festzustellen.

Entwickelt man Glchg. 50) nach $z_{m,z}$ bezw. $z_{m,z+1}$, so erhält man

$$51a)\ .\ .\ .\quad z_{m,z}=\frac{60\,w}{z+1}-\frac{z\,.\,z_{m,z+1}}{z+1}$$

und

$$51b)\ .\ .\quad z_{m,z+1}=\frac{60\,w}{z}-\frac{(z+1)\,z_{m,z}}{z}$$

Nun erreichen $z_{m,z}$ bezw. $z_{m,z+1}$ ihren größten Wert, wenn in Glchg. 51a) und Glchg. 51b) $z=z_{min}$ und $z_{m,z+1}$ bezw. $z_{m,z}$ = Null wird.

Man erhält auf diese Weise

$$52a)\ .\ .\ .\quad z_{(m,z)\,max}=\frac{60\,w}{z_{min}+1}$$

und

$$52b)\ .\ .\ .\quad z_{(m,z+1)\,max}=\frac{60\,w}{z_{min}}$$

Bei der Scheibenserie, welche meiner Methode zugrunde liegt, ist $z_{min}=40$; w ist in der Regel $\cong 100$ pro Sek.

Mit diesen Zahlenwerten wird nach Glchg. 52a) und 52b)

$$z_{(m,z)\,max}\cong 146$$

und

$$z_{(m,z+1)\,max}\cong 150$$

das heißt: Bei der angegebenen üblichen Stromwechselzahl ($w\cong 100$ entsprechend $\nu\cong 50$ pro Sek.) muß $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ stets kleiner als 150 sein; daraus folgt aber, daß man auch stets in der Lage sein wird, die Werte $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ durch Abzählen mit Sicherheit bis auf einen Streifen genau festzustellen.

Damit läßt sich nun der Wert η_w bestimmen, bis auf welchen zunächst die nach der entwickelten Methode bezw. nach Glchg. 50) berechnete Frequenz w des Wechselstroms mindestens richtig sein muß oder höchstens falsch sein kann. Bezeichnet man die Fehler, welche bei dem Abzählen von $z_{m,z}$ bezw. $z_{m,z+1}$ gemacht worden seien, mit $f(z_{m,z})$ bezw. mit $f(z_{m,z+1})$, so ist nach den obigen Erörterungen

$$53)\ .\ .\ .\quad f(z_{m,z})\ \text{und}\ f(z_{m,z+1})=\pm 1$$

Nun ist aber offenbar η_w — der Wert also, bis auf welchen die nach Glchg. 50) berechnete Frequenz w mindestens richtig sein muß, oder was dasselbe ist, der Fehler, welcher bei der Ausrechnung von Glchg. 50) auf Grund der durch Abzählen bestimmten Werte von $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ höchstens gemacht werden kann — dann am größten, wenn $f(z_{m,z})$ und $f(z_{m,z+1})$ entweder beide gleich $+1$ oder beide gleich -1 sind.

In diesen beiden Fällen wird nach Glchg. 50)

$$54)\ .\ .\quad \eta_w=\frac{1}{60}\left[z\,(z_{m,z+1}\pm 1)+(z+1)\,(z_{m,z}\pm 1)\right]-\frac{1}{60}\left[z\,.\,z_{m,z+1}+(z+1)\,z_{m,z}\right]=\pm\frac{2\,z+1}{60}$$

Bei der Scheibenserie der Tabelle I ist $z=40$—50; dementsprechend wird nach Glchg. 54)

$$55)\ .\ .\ .\ .\quad \eta_w=\pm\,1{,}35-1{,}68$$

das heißt: Der auf die angegebene Weise nach Glchg. 50) berechnete Wert w muß bis auf etwa 1,35 bis 1,68 Stromwechsel (je nach der Streifenzahl z der benutzten Scheiben) oder durchschnittlich bis auf etwa 1,5 Stromwechsel pro Sek. richtig sein. Da nun in der Regel $w\cong 100$ pro Sek. ist, so bezeichnet η_w (Glchg. 55) gleichzeitig auch den prozentualen Ungenauigkeitsgrad der nach Glchg. 50) berechneten Frequenz des Wechselstroms.

Benutzt man also den entworfenen Schlüpfungsmesser als stroboskopischen Periodenmesser, was auf Grund der Glchg. 50) ohne weiteres möglich ist, so haben die Versuchsergebnisse des Apparates bezw. die mit demselben ermittelten Werte w Anspruch auf etwa 1—2 % Genauigkeit.

Nach diesen Erörterungen hat es zunächst den Anschein, als ob die Motorschlüpfung $s\,\%$ — wenn man sie in der Weise berechnet, daß man den nach Glchg. 50) aus $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ ermittelten Wert w mit $z_{m,z}$ oder $z_{m,z+1}$ in eine der beiden Formeln für $s\,\%$ der Scheiben mit der Streifenzahl z bezw. $z+1$ einsetzt — durch die verhältnismäßig große Ungenauigkeit (1—2 %) des nach Glchg. 50) ermittelten Wertes w weniger Anspruch auf Genauigkeit haben müsse, als eine Schlüpfungsmessung, bei welcher der Wert w genau bekannt ist.

Das ist in Wirklichkeit aber nicht zutreffend; zunächst muß man bedenken, daß der Wert w im Nenner des letzten Gliedes der Formeln für $s\,\%$ (Glchg. 47 und 48) steht, daß also eine Ungenauigkeit des Wertes w von 1—2 % nur eine verhältnismäßig ganz geringe Ungenauigkeit des Gesamtwertes von $s\,\%$ hervorrufen kann; ferner steht der Fehler des nach Glchg. 50) berechneten Wertes w in einem festen Zusammenhang zu den Fehlern, die bei der Ermittlung von $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ gemacht worden sind; da nun in den Formeln für $s\,\%$ (Glchg. 47 und 48) $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ im Zähler des letzten Gliedes stehen, während w im Nenner desselben Gliedes auftritt, schwächen sich die Fehler von $z_{m,z}$ bezw. $z_{m,z+1}$ und w nicht nur gegenseitig ab, sondern können sich sogar vollständig aufheben. Eine genaue theoretische Untersuchung zeigt, daß jede

Schlüpfungsermittlung nach der angegebenen Methode — wenn man also den Wert w mittels derjenigen beiden Streifenscheiben bestimmt, bei welchen sich die stroboskopischen Bilder im entgegengesetzten Sinne drehen und diesen Wert w (Glchg. 50) mit $z_{m,z}$ oder $z_{m,z+1}$ in eine der beiden Formeln für $s\,\%$ (Glchg. 47 bezw. 48) jener beiden Scheiben einsetzt — mindestens ebenso genau sein muß, wie eine Schlüpfungsermittlung, bei welcher man den Wert w vollkommen genau kennt, daß also der Ungenauigkeitsgrad in beiden Fällen der Glchg. 42) entsprechend

$$\eta_s \leqq \frac{200}{3\,w\,z}$$

ist.

Da nun $w \backsim 100$ pro Sek. und $z \geqq 40$ ist, wird

$$\eta_s \leqq \frac{1}{60}$$

Das heißt:

Jede mit dem entworfenen Schlüpfungsmesser ausgeführte Bestimmung des Wertes $s\,\%$ muß stets bis auf mindestens $^1/_{60}\,\%$ richtig sein; dabei ist es gleichgültig, ob man den Wert von w genau kennt, oder denselben mittels des Schlüpfungsmessers unter Anwendung der Glchg. 50) berechnet.

Die mathematisch-theoretischen Entwicklungen, welche zu diesem Ergebnis führen, sind ziemlich umständlich und langwierig; ich beschränke mich daher an dieser Stelle darauf, das Endergebnis angeführt zu haben und werde am Schlusse dieser Zeilen an der Hand eines einfachen der Praxis entnommenen Zahlenbeispieles den Nachweis liefern, daß das angeführte Ergebnis der theoretischen Untersuchungen richtig ist.

Will man nach der im vorliegenden Nachtrag entwickelten allgemeinen Methode experimentell die prozentuale Schlüpfung eines Asynchronmotors bestimmen, so verfährt man folgendermaßen: Nachdem der Schlüpfungsmesser in passender Weise vor dem zu untersuchenden Asynchronmotor aufgestellt (vergl. Fig. 3) und in Gang gebracht worden ist, steckt man die erste Scheibe ($z = 40$) der Serie von Tabelle I auf die Holzscheibe des Apparates und beobachtet das dann erscheinende erste stroboskopische Hauptbild, welches bei dieser Scheibe stets entgegengesetzt ihrer wirklichen Drehrichtung rotiert, da der Asynchronmotor immer mit einer gewissen Schlüpfung läuft. Nunmehr achtet man auf die Drehgeschwindigkeit des stroboskopischen Bildes. Ist die Zahl $z_{m,40}$ der während einer Minute an dem Zeiger w (Tafel I) vorübergehenden schwarzen oder weißen stroboskopischen Streifen so groß, daß man sie durch Abzählen nicht mehr feststellen vermag — was der Fall ist, wenn $z_m > 150$ pro Min. wird — so entfernt man die erste Scheibe ($z = 40$) und bringt die nächstfolgende ($z = 41$) auf den Apparat. Das Auswechseln der Scheiben geschieht, wie bereits weiter oben auseinandergesetzt worden ist, während des Betriebes, also ohne daß der Motor abgestellt zu werden braucht.

Bei der zweiten Scheibe ($z = 41$) muß die Drehgeschwindigkeit des stroboskopischen Bildes schon geringer sein, wie bei der ersten ($z = 40$); ist die Motorschlüpfung $s\,\% < 2{,}44$, so dreht sich das stroboskopische Bild dieser Scheibe ($z = 41$) bereits im Sinne ihrer Drehrichtung (vergl. Tabelle I, Spalte 3, Scheibe 41), also entgegengesetzt der Drehrichtung des stroboskopischen Bildes der vorhergehenden Scheibe ($z = 40$). Ist dagegen die prozentuale Motorschlüpfung $s\,\% > 2{,}44$, so wird sich auch bei der zweiten Scheibe ($z = 41$) der Serie von Tabelle I das stroboskopische Bild immer noch entgegengesetzt ihrer Drehrichtung bewegen. Ist dies der Fall, so entfernt man auch diese Scheibe ($z = 41$) und bringt wiederum die nächstfolgende ($z = 42$) auf den Apparat; in dieser Weise fährt man nun solange fort, bis bei einer bestimmten Scheibe das stroboskopische Bild, das sich bei den vorhergehenden Scheiben mit geringerer Streifenzahl entgegengesetzt der Drehrichtung der Scheiben bewegte, plötzlich im Sinne der Scheibe läuft, seine Drehrichtung also umkehrt. Diese Scheibe und die unmittelbar vorhergehende, die beiden Streifenscheiben also, bei denen sich die stroboskopischen Bilder im entgegengesetzten Sinne drehen, sind für die weiteren Ermittlungen maßgebend. Die Streifenzahl dieser beiden Scheiben möge entsprechend den obigen Entwicklungen (Glchg. 45) z bezw. $z + 1$ sein.

Mit Hilfe des entworfenen Schlüpfungsmessers gelingt es schnell und leicht, in der angegebenen Weise jene beiden Streifenscheiben der Serie von Tabelle I für jede beliebige Tourenzahl des Asynchronmotors ausfindig zu machen. Ist dies geschehen, so ermittelt man für diese beiden Scheiben die Werte von $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$, das ist die Zahl der während einer Minute an dem Zeiger w (Tafel I) des Schlüpfungsmessers vorübergehenden hellen oder dunklen stroboskopischen Streifen der ersten Scheibe (Streifenzahl z) bezw. der zweiten (Streifenzahl $z + 1$).

Setzt man nunmehr die Werte z, $z + 1$, $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ in Glchg. 50) ein, so hat man zunächst den Wert von w. Durch Einsetzen dieses Wertes w mit einem der Werte $z_{m,z}$ oder $z_{m,z+1}$ in eine der Formeln für $s\,\%$ (Tabelle I, Spalte 3) jener beiden Scheiben mit der Streifenzahl z bezw. $z + 1$ erhält man den bis auf mindestens $^1/_{60}\,\%$ genauen Wert der prozentualen Schlüpfung des Asynchronmotors. Zu beachten ist dabei noch, daß bei der ersten Scheibe (Streifenzahl z) das positive Vorzeichen von $z_{m,z}$ zu nehmen ist, weil ihr stroboskopisches Bild sich nach den obigen Entwicklungen entgegengesetzt ihrer Drehrichtung bewegt, während bei der zweiten Scheibe (Streifenzahl $z + 1$) das negative Vorzeichen des Wertes $z_{m,z+1}$ zu wählen ist, weil ihr stroboskopisches Bild im Sinne ihrer Drehrichtung rotiert (vergl. Glchg. 47 u. 48).

Selbstverständlich muß sich für $s\,\%$ derselbe Wert ergeben, gleichgültig ob man die Formel der ersten oder der zweiten Scheibe der Ausrechnung zugrunde legt.

Bevor ich den Gegenstand dieser Abhandlung verlasse, möchte ich noch zum Schluß auf die einfache Beziehung hinweisen, welche zwischen $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ einerseits und der Tourenzahl n des Asynchronmotors andererseits besteht.

Nach Glchg. 16) ist

$$56) \quad \ldots\ldots \quad n = n_1 - s,$$

wo n_1 die Tourenzahl des Motors bei synchronem Laufe und s die Schlüpfung in Umdrehungen pro Min. bezeichnet.

Nun beträgt aber der Wert der Schlüpfung (nicht der prozentualen Schlüpfung) bei Benutzung der Scheibe mit der Streifenzahl z nach Glchg. 29)

$$57\text{a}) \quad s = \frac{60\,w}{p} - \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{60\,w}{z} \overset{+}{\underset{(-)}{}} \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{z_{m,z}}{z}$$

Das positive Vorzeichen von $z_{m,z}$ ist zu nehmen, weil sich das stroboskopische Bild der Scheibe mit der Streifenzahl z nach den obigen Erörterungen entgegengesetzt ihrer Drehrichtung bewegt.

Für die zweite Scheibe (Streifenzahl $z + 1$) ist nach derselben Glchg. 29)

$$57\text{b)} \quad s = \frac{60\,w}{p} - \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{60\,w}{z+1} (+) \frac{1}{\varphi} \frac{z_{m,z+1}}{z+1}$$

Hier ist das negative Vorzeichen von $z_{m,z+1}$ zu nehmen, weil sich das stroboskopische Bild dieser Scheibe (Streifenzahl $z + 1$) im Sinne ihrer Drehrichtung bewegt.

Ferner ist nach Glchg. 12)

$$58) \quad \ldots\ldots \quad n_1 = \frac{60\,w}{p}$$

Setzt man nun in Glchg. 56) für n_1 den Wert der Glchg. 58) und für s den Wert der Glchg. 57a bezw. 57b ein, so erhält man

$$59\text{a)} \quad \ldots \quad n = \frac{1}{\varphi \, . \, z} \, . \, (60\,w - z_{m,z})$$

bezw.

$$59\text{b)} \quad . \quad n = \frac{1}{\varphi\,(z+1)} \, . \, (60\,w + z_{m,z+1})$$

Nun ist aber nach Glchg. 50)

$$60\,w = z \, . \, z_{m,z+1} + (z+1)\, z_{m,z}$$

Substituiert man diesen Wert in Glchg. 59a) und 59b), so erhält man in beiden Fällen

$$60) \quad \ldots \quad n = \frac{1}{\varphi} (z_{m,z} + z_{m,z+1})$$

Bezeichnet man schließlich noch die wirkliche Tourenzahl jener beiden Streifenscheiben mit n' und bedenkt, daß $n' = n \, . \, \varphi$ ist, so nimmt Glchg. 60) die Form an

$$61) \quad \ldots \quad n' = z_{m,z} + z_{m,z+1}$$

Das heißt:

„Die Summe der während einer Minute an einer bezeichneten Stelle des Raumes vorübergehenden schwarzen oder weißen stroboskopischen Streifen derjenigen beiden Scheiben der Serie von Tabelle I, deren stroboskopische Bilder im entgegengesetzten Sinne rotieren, ist gleich der Tourenzahl dieser Scheiben."

Auf Grund der Glchg. 60) und 61) kann man also den entworfenen Schlüpfungsmesser auch als „stroboskopischen Tourenmesser" benutzen. Allerdings ist bei dieser Verwendung des Apparates die Genauigkeit der betreffenden Bestimmungen nicht sehr groß.

Nach Glchg. 53) sind die Fehler, welche bei dem Abzählen von $z_{m,z}$ und $z_{m,z+1}$ höchstens gemacht werden können

$$f\,(z_{m,z}) \text{ und } f\,(z_{m,z+1}) = \pm 1$$

Der ungünstigste Fall ist dabei der, daß $f\,(z_{m,z})$ und $f\,(z_{m,z+1})$ beide $= + 1$ oder beide $= - 1$ werden; damit ergibt sich der Ungenauigkeitsgrad der Glchg. 60)

$$62) \quad \ldots\ldots \quad \eta_n \leqq \pm \frac{2}{\varphi}$$

und derjenige der Glchg. 61)

$$62\text{a)} \quad \ldots\ldots \quad \eta_{n'} \leqq \pm 2$$

Bei dem entworfenen Schlüpfungsmesser ist nach Glchg. 37) stets $\varphi = \frac{p}{40}$; setzt man diesen Wert noch in Glchg. 62) ein, so wird

$$63) \quad \ldots\ldots \quad \eta_n \leqq \pm \frac{80}{p}$$

Hat man also z. B. einen vierpoligen Motor ($p = 4$), so muß die nach Glchg. 60) ermittelte Tourenzahl n desselben mindestens bis auf 20 Touren (vergl. Glchg. 63) oder 1,3 % (für $w \simeq 100$ pro Sek.) richtig sein.

Zum Schlusse führe ich ein Zahlenbeispiel an, welches meinen praktischen Versuchen entnommen ist.

Beispiel.

Vierpoliger Drehstrommotor der Betriebswerkstätte Mainz.

Der Motor ist voll belastet.

$$w = 103, \quad p = 4, \quad \varphi = \frac{p}{40} = \frac{1}{10}$$

1. Versuch.

Die Frequenz des Wechselstromes ist genau bekannt.

$$w = 103$$

Mittels des Schlüpfungsmessers wird festgestellt, daß bei der dritten Streifenscheibe ($z = 42$) der Serie von Tabelle I der Wert $z_{m,42} = 34$ ist; dabei bewegt sich das stroboskopische Bild dieser Scheibe in der Drehrichtung derselben.

Dann wird nach Tabelle I, Spalte 3, Reihe 3 ($z = 42$)

$$s\,\% = 4{,}762 - 1{,}588 \, . \, \frac{34}{103} = \mathbf{4{,}238}$$

Bezüglich des Vorzeichens von $z_{m,42}$ gilt das, was im Anschluß an Glchg. 28) und 29) gesagt worden ist. Bemerkt sei ferner noch, daß die Zahlenwerte der Tabelle I auf zwei Dezimalstellen abgerundet sind, während sie an dieser Stelle, um die Genauigkeitsgrade bezw. die Ungenauigkeiten der nach der entwickelten Methode berechneten Werte von s % klarzulegen, bis auf 3 Dezimalstellen angegeben sind.

Ungenauigkeitsberechnung.

a) $f\,(z_{m,42}) = + 1$ (vergl. Glchg. 53) entsprechend

$$z_{m,42} = 34 + 1 = 35$$

$$s\,\% = 4{,}762 - 1{,}588 \, . \, \frac{35}{103} = 4{,}223$$

$$\eta_s = 4{,}223 - 4{,}238 = -\,0{,}015 \simeq -\,{}^{1}/_{65}\,\%$$

b) $f\,(z_{m,42}) = - 1$ entsprechend

$$z_{m,42} = 34 - 1 = 33$$

$$s\,\% = 4{,}762 - 1{,}588 \, . \, \frac{33}{103} = 4{,}253$$

$$\eta_s = 4{,}253 - 4{,}238 = +\,0{,}015 \simeq +\,{}^{1}/_{65}\,\%$$

2. Versuch.

Der Wert w ist als unbekannt angenommen.

Die Streifenzahl der beiden Scheiben, bei denen das stroboskopische Bild seine Drehrichtung umkehrt, ist

$$z = 41 \text{ und } z + 1 = 42$$

Für diese beiden Scheiben wird ferner ermittelt

$$z_{m,41} = 114 \text{ und } z_{m,42} = 34$$

Nun ist nach Glchg. 50)

$$w = \frac{1}{60}(41 \,.\, 34 + 42 \,.\, 114) = 103{,}03$$

Damit wird nach Glchg. 47) bezw. nach Tabelle I, Spalte 3, Reihe 2 ($z = 41$)

$$s\,\% = 2{,}439 + 1{,}626 \,.\, \frac{114}{103{,}03} = \mathbf{4{,}238}$$

und nach Glchg. 48) bezw. nach Tabelle I, Spalte 3, Reihe 3 ($z = 42$)

$$s\,\% = 4{,}762 - 1{,}588 \,.\, \frac{34}{103{,}03} = \mathbf{4{,}238}$$

Ungenauigkeitsberechnung.

a) $f(z_{m,41}) = +1, \; f(z_{m,42}) = +1$
(vergl. Glchg. 53)

entsprechend

$$z_{m,41} = 114 + 1 = 115 \text{ und } z_{m,42} = 34 + 1 = 35$$

Damit wird

$$w = \frac{1}{60}(41 \,.\, 35 + 42 \,.\, 115) = 104{,}4$$

$$\eta_w = 104{,}4 - 103 = +1{,}4 \cong +1{,}35\,\%$$

$$s\,\%_{(z=41)} = 2{,}439 + 1{,}626 \,.\, \frac{115}{104{,}4} = 4{,}230$$

und

$$s\,\%_{(z=42)} = 4{,}762 - 1{,}588 \,.\, \frac{35}{104{,}4} = 4{,}230$$

$$\eta_s = 4{,}230 - 4{,}238 = -0{,}008 \cong -{}^1/_{100}\,\%$$

b) $f(z_{m,41}) = -1, \; f(z_{m,42}) = -1$

$$z_{m,41} = 114 - 1 = 113 \text{ und } z_{m,42} = 34 - 1 = 33$$

Damit wird

$$w = \frac{1}{60}(41 \,.\, 33 + 42 \,.\, 113) = 101{,}65$$

$$\eta_w = 101{,}65 - 103 = -1{,}35 \cong -1{,}3\,\%$$

$$s\,\%_{(z=41)} = 2{,}439 + 1{,}626 \,.\, \frac{113}{101{,}65} = 4{,}246$$

und

$$s\,\%_{(z=42)} = 4{,}762 - 1{,}588 \,.\, \frac{33}{101{,}65} = 4{,}246$$

$$\eta_s = 4{,}246 - 4{,}238 = +0{,}008 \cong +{}^1/_{100}\,\%$$

c) $f(z_{m,41}) = +1, \; f(z_{m,42}) = -1$

$$z_{m,41} = 114 + 1 = 115, \; z_{m,42} = 34 - 1 = 33$$

$$w = \frac{1}{60}(41 \,.\, 33 + 42 \,.\, 115) = 103{,}05$$

$$\eta_w = 103{,}05 - 103 = +0{,}05 \cong +{}^1/_{20}\,\%$$

$$s\,\%_{(z=41)} = 2{,}439 + 1{,}626 \,.\, \frac{115}{103{,}05} = 4{,}253$$

und

$$s\,\%_{(z=42)} = 4{,}762 - 1{,}588 \,.\, \frac{33}{103{,}05} = 4{,}253$$

$$\eta_s = 4{,}253 - 4{,}238 = +0{,}015 \cong {}^1/_{65}$$

d) $f(z_{m,41}) = -1, \; f(z_{m,42}) = +1$

$$z_{m,41} = 114 - 1 = 113 \text{ und } z_{m,42} = 34 + 1 = 35$$

$$w = \frac{1}{60}(41 \,.\, 35 + 42 \,.\, 113) = 103{,}02$$

$$\eta_w = 103{,}02 - 103 = +0{,}02 \cong +{}^1/_{50}\,\%$$

$$s\,\%_{(z=41)} = 2{,}439 + 1{,}626 \,.\, \frac{113}{103{,}02} = 4{,}223$$

und

$$s\,\%_{(z=42)} = 4{,}762 - 1{,}588 \,.\, \frac{35}{103{,}02} = 4{,}223$$

$$\eta_s = 4{,}223 - 4{,}238 = -0{,}015 \cong -{}^1/_{65}\,\%$$

Setzt man die Werte $z_{m,z} = 114$, $z_{m,z+1} = 34$ und $\varphi = \frac{1}{10}$ in Glchg. 60) bezw. 61) ein, so erhält man schließlich noch

$$n = 10\,(114 + 34) = 1480$$

bezw.

$$n' = 114 + 34 = 148$$

Die Ungenauigkeit dieser beiden Werte ist nach Glchg. 62) bezw. 62a) höchstens

$$\left.\begin{array}{l} \eta_n \leqq \pm 20 \\ \eta_{n'} \leqq \pm 2 \end{array}\right\} \text{ oder } \leqq 1{,}3\,\%$$

bezw.

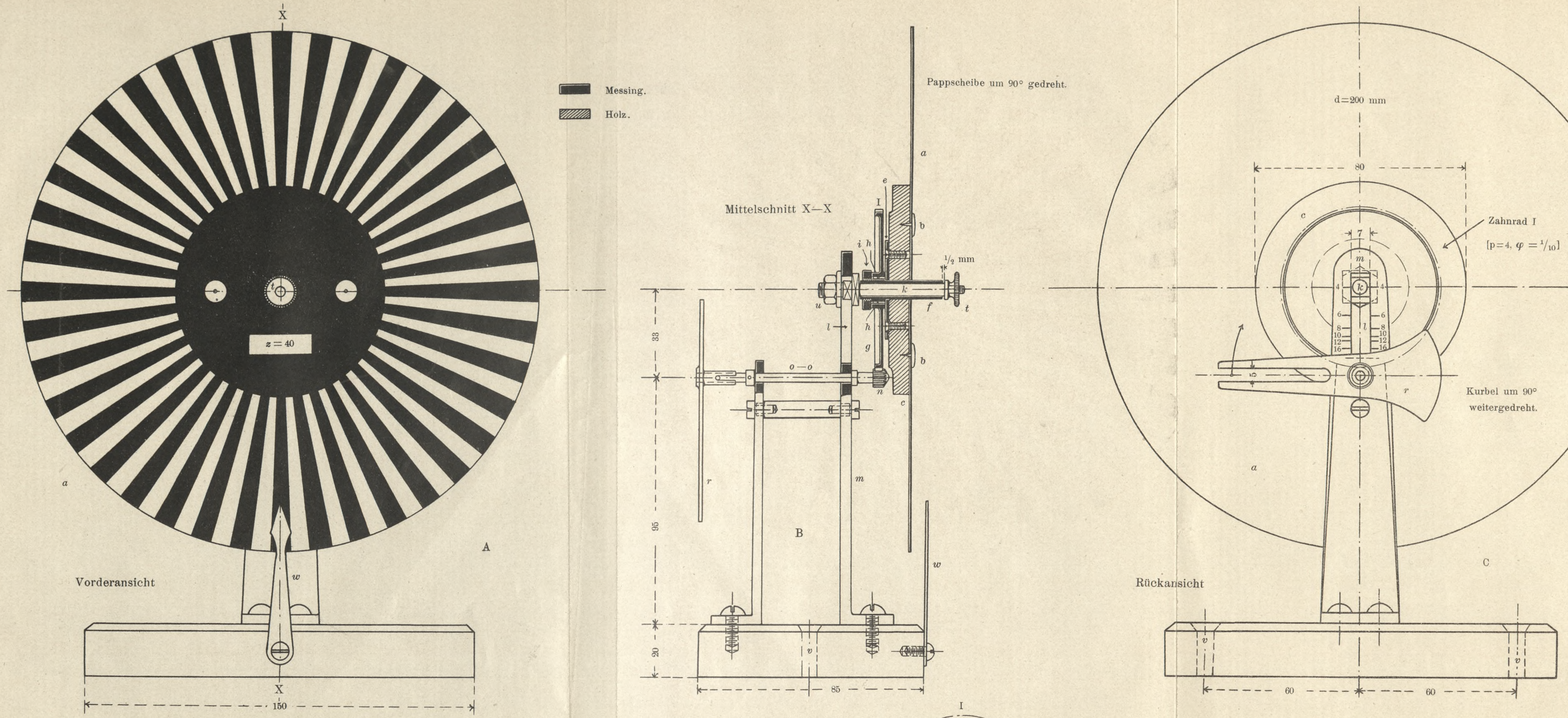
Proberechnung: Bei 4,238 % Schlüpfung und $w = 103$ ist die tatsächliche Tourenzahl des Asynchronmotors

$$n = \frac{60 \,.\, 103}{4} - \frac{4{,}238}{100} \,.\, \frac{60 \,.\, 103}{4} = 1479{,}5$$

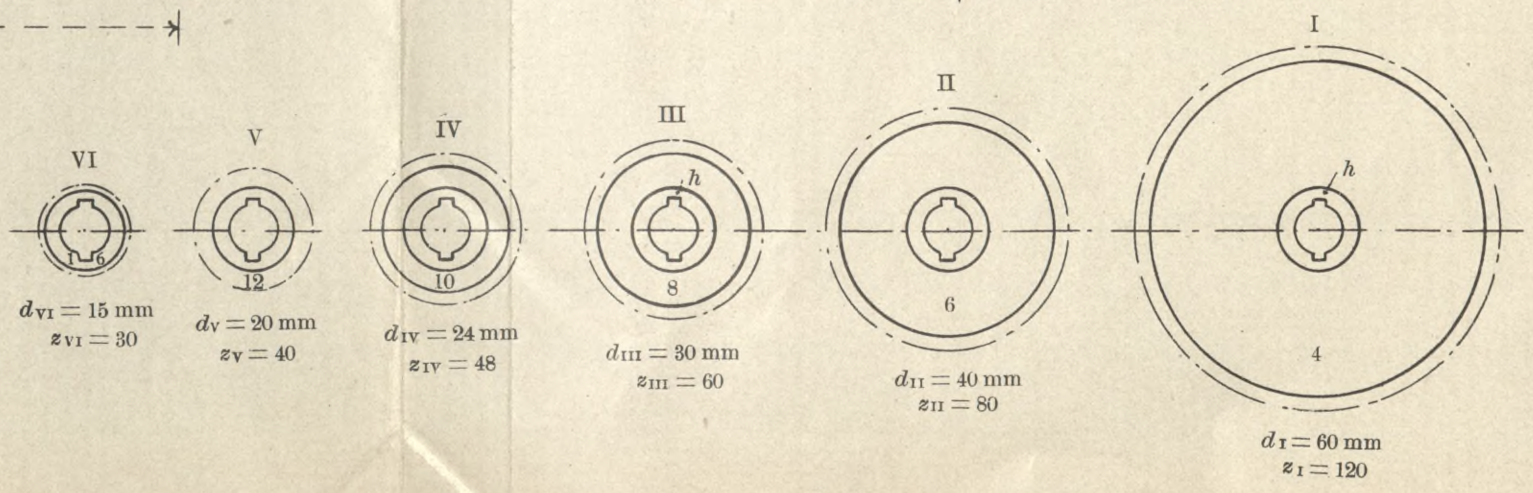
In Wirklichkeit ist also

$$\eta_n = 1479{,}5 - 1480 = -0{,}5 \cong {}^1/_{30}\,\%$$

Druck von H. S. Hermann in Berlin.



Zahnrädersatz des Schlüpfungsmessers.



Stroboskopischer Schlüpfungsmesser
für
asynchrone Wechsel- und Drehstrommotoren.

Verlag von Julius Springer in Berlin.